3-е издание

Автомобильный справочник



BOSCH

Разработано для жизни

издательство За рулем



Автомобильный справочник
3-е издание



BOSCH

Invented for life

Automotive Handbook



BOSCH

Invented for life

Автомобильный справочник

издательство За рулем

ОК 005-93; т. 2; 95 3750
УДК 629.113 (031), 629.33
ББК 39.88
А18

Авторы
Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Dietsche
и 160 авторов, работающих в отрасли или преподающих в отраслевых университетах и колледжах.

Техническая графика
Bauer & Partner, Gesellschaft fur technische Grafik mbH, Stuttgart; Schwarz Technische Grafik, Leonberg.

Автомобильный справочник. Пер. с англ. ООО «СтарСПб» – 3-е изд., А18 перераб. и доп. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. – 1280 с.: ил.

ISBN 978-5-9698-0406-7

Третье издание ставшего уже популярным в России автомобильного справочника известной фирмы Bosch содержит самые необходимые сведения по устройству современного автомобиля и его основных систем, автомобильным материалам, перевозкам, безопасности движения, а также по физике, химии, математике, метрологии и многим другим отраслям знаний, с которыми сталкиваются в своей практической деятельности инженеры-автомобилисты.

1-е изд. вышло в 1999 г.

2-е изд. вышло в 2004 г.

Справочник предназначен для инженеров автомобильного профиля, студентов автомобильных специальностей, а также может быть полезен автомеханикам и водителям.

Воспроизведение в любой форме настоящего справочника или любой его части запрещается без предварительного разрешения обладателя авторских прав.

ББК 39.88

ISBN 978-5-9698-0406-7

Bosch. Automotive Handbook. 8th Edition

© Robert Bosch GmbH, P.O. Box 10 60 50, D-70049 Stuttgart, Federal Republic of Germany
© ООО «Книжное издательство «За рулем», перевод на русский язык, 2012

Текстовый и изобразительный материал, а также схемы, были предоставлены следующими компаниями:

Automotive Lighting Reutlingen GmbH.

BASF Coatings AG, Munster.

Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart.

Bosch Mahle Turbo Systems GmbH & Co. KG, Stuttgart.

Continental AG, Hannover.

Continental Automotive, Frankfurt.

Daimler AG, Stuttgart.

Daimler AG, Sindelfingen.

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach.

ETAS GmbH, Stuttgart.

Gates GmbH, Aachen.

IAV GmbH, Berlin.

IWIS Ketten, Joh. Winklhofer & Sohne GmbH & Co. KG, Munchen.

J. Eberspacher GmbH & Co. KG, Esslingen.

Kiekert AG, Heiligenhaus.

Knorr-Bremse SfN, Schwieberdingen.

KS Gleitlager GmbH.

MAN Nutzfahrzeuge Gruppe.

Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg.

Mazda Motors (Deutschland) GmbH.

Saint-Gobain Sekurit International, Herzogenrath.

VB Autobatterie GmbH & Co. KGaA, Hannover.

Volkswagen AG, Wolfsburg.

ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen.

ZF Lenksysteme GmbH, Schwabisch Gmund.

Duale Hochschule Baden-Wurttemberg, Ravensburg, Campus Friedrichshafen.

Fachhochschule Köln.

Friedrich-Aiexander-Universitat Erlangen-Nurnberg.

Hochschule Esslingen.

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft.

Hochschule Munchen.

Reinhold-Wurth-Hochschule, Kunzelsau.

Rheinisch-Westfalische Technische Hochschule (RWTH) Aachen.

Вступление

За последние несколько десятилетий автомобилестроение превратилось в чрезвычайно сложную отрасль. Становится все более трудно представить описание всей отрасли и постоянно отслеживать направления, которые важны для автомобилестроения. Многие из этих направлений были подробно описаны в многочисленной специальной литературе. Тем не менее, для читателя, который сталкивается с данными темами в первый раз, имеющаяся литература не представляется легкой и тяжело усваивается в ограниченные сроки.

В этой связи настоящий «Автомобильный справочник» будет очень кстати. Он структурирован таким образом, чтобы быть понятным даже для тех читателей, которые впервые встречаются с каким-либо разделом. Наиболее важные темы, относящиеся к автомобилестроению, собраны в компактном, простом для понимания и удобном с практической точки зрения виде, благодаря тому, что весь материал был написан специалистами Bosch и других автомобильных производителей и поставщиков, работающих именно в направлениях, охваченных в настоящем справочнике.

Вся структура «Автомобильного справочника» была полностью пересмотрена. Новая компоновка лучше отражает значимость новых технических областей, имеющих важность для автомобилестроения. Главы, посвященные двигателям внутреннего сгорания, системам ходовой части и сетевого взаимодействия с шинными системами, были кардинально пересмотрены и существенно отредактированы. Большинство остальных глав также были изменены и расширены. Чтобы подчеркнуть важность «Автомобильного справочника», главы о базовых научных принципах автомобилестроения также были отредактированы и приведены в соответствие с последними требованиями отрасли. Кроме того, «Автомобильный справочник» содержит дополнительные таблицы и числовые формулы, чтобы издание могло быть использовано эффективно и рационально на практике и в рабочих условиях. Несмотря на большое количество авторов, внесших свой вклад в составление справочника, были приложены значительные усилия для унификации материала и создания единообразия используемых классификаций и номенклатуры.

Настоящая последняя редакция не могла бы увидеть свет без неоценимой поддержки многих людей. В первую очередь, мы бы хотели поблагодарить авторов отдельных статей, которые с завидным терпением и заботой сумели подготовить в срок и качественно главы, имеющие наибольшую важность. За их профессиональные консультации и поддержку, помимо прочего, в конечной фазе создания справочника, выражаем свою благодарность следующим людям: Dr.-Ing K. Benninger, Prof. Dr.-Ing K. Binder, Prof. Dr.-Ing S. Engelking, и Prof. Dr.-Ing M. Freitag. И наконец, хотелось бы поблагодарить читателей, направивших свои предложения и рекомендации по внесению корректировок в окончательный текст.

Friedrichshafen and Plochingen, октябрь 2010 г,

Научный консультант и редактор,
а также редакционная коллегия.

Содержание

Действующие единицы
Величины и единицы измерения ... 22
Международная система единиц (СИ) ... 22
Действующие единицы ... 24
Дополнительные единицы ... 30
Физические константы ... 33

Основные принципы физики
Основные уравнения, применяемые в механике ... 34
Прямолинейное и вращательное движение ... 34
Передача силы ... 34
Трение ... 37
Колебания и вибрации ... 40
Определения ... 40
Уравнения ... 42
Ослабление вибрации ... 43
Модальный анализ ... 44
Акустика ... 46
Общие понятия ... 46
Единицы измерения шума ... 48
Величины для оценки воздействия шума (защита от шума) ... 49
Воспринимаемые уровни шума ... 50
Гидростатика ... 52
Плотность и давление ... 52
Плавучесть ... 52
Гидромеханика ... 53
Основные принципы ... 53
Основные уравнения гидромеханики ... 54
Вытекание жидкости из резервуара под давлением ... 54
Сопротивление тел, находящихся в потоке жидкости ... 55
Термодинамика ... 56
Энтальпия (теплосодержание) ... 56
Законы термодинамики ... 58
Изменения состояния идеального газа ... 59
Электротехника ... 60
Электромагнитные поля ... 60
Электрическое поле ... 60
Постоянный электрический ток и напряжение постоянного тока ... 62
Переменный электрический ток ... 65
Магнитное поле ... 66
Магнитное поле и электрический ток ... 70
Распространение волн ... 74
Электрические эффекты в металлических проводниках ... 77
Электроника ... 80
Базовые принципы полупроводниковой технологии ... 80
Дискретные полупроводниковые приборы ... 83
Монолитные интегральные схемы ... 95
Микропроцессоры в блоке управления ... 96
Электрохимия ... 99
Проводимость электролитов и электролиз ... 99
Применение метода ... 100

Математика и методы вычислений
Математика ... 104
Системы чисел ... 104
Функции ... 104
Уравнения для плоского треугольника ... 106
Комплексные числа ... 107
Математические знаки и символы ... 107
Греческий алфавит ... 107
Метод конечных элементов ... 108
Применение ... 108
Примеры FEM ... 111
Техника автоматического регулирования ... 116
Термины и определения ... 116
Техника автоматического управления, элементы передачи ... 117
Разработка задачи управления ... 118
Адаптивные блоки управления ... 120

Материалы
Химические элементы ... 122
Обозначение ... 122
Периодическая система элементов Д.И. Менделеева ... 125
Определения ... 126
Параметры материалов ... 126
Свойства твердых материалов ... 128
Свойства жидкостей ... 132
Испарение воды ... 133
Свойства газов ... 134
Группы материалов ... 135
Стандарты EN по металлургии ... 139
Стандартизация металлов ... 139
Классификация сталей ... 140
Стандартизация чугунов ... 141
Цветные металлы и сплавы ... 142
Свойства металлов
Пружинная сталь ... 147

Кузовные тонколистовые металлы..... 148
Цветные металлы..... 149
Легкие сплавы..... 150
Металлокерамические материалы (РМ) для подшипников скольжения..... 151
Металлокерамические материалы (РМ) для конструкционных деталей..... 152
Магнитные материалы..... 154
Магнитомягкие металлы..... 155
Материалы для преобразователей и электрических реакторов..... 156
Материалы для реле постоянного тока..... 157
Металлокерамические материалы для магнитомягких компонентов.. 158
Магнитомягкие ферриты..... 159
Металлы для постоянных магнитов..... 160
Материалы для пайки..... 163
Электрические свойства..... 166
Свойства неметаллических материалов... 167
Изоляционные материалы..... 167
Керамические материалы..... 168
Слоистые материалы..... 170
Пластмассы..... 171
Кодовое обозначение, химическое название и торговая марка пластмасс..... 178
Термическая обработка металлов..... 182
Твердость..... 182
Процессы термической обработки..... 186
Химико-термическая обработка..... 191
Коррозия и защита от коррозии..... 194
Процессы коррозии..... 194
Виды коррозии..... 196
Испытания на коррозионную стойкость..... 197
Защита от коррозии..... 200
Осаждения и покрытия..... 203
Осаждение..... 203
Диффузионные покрытия..... 207
Конверсионные покрытия..... 207

Рабочие жидкости

Смазочные материалы..... 208
Термины и определения..... 208
Моторные масла..... 213
Трансмиссионные масла..... 216
Смазочные масла..... 217
Пластичные смазки..... 218
Топливо..... 220
Характеристики..... 220
Бензины..... 221
Дизельное топливо..... 224
Альтернативные виды топлив..... 228
Свойства жидких топлив и углеводородов..... 234
Свойства газообразных топлив и углеводородов..... 235
Тормозные жидкости и антифризы..... 236
Тормозные жидкости..... 236
Охлаждающие жидкости..... 238

Детали машин

Пружины..... 240
Основные принципы..... 240
Металлические пружины..... 241
Подшипники скольжения
Характеристики..... 246
Гидродинамические подшипники скольжения..... 246
Металлокерамические подшипники скольжения..... 251
Подшипники со скользящим контактом..... 252
Подшипники качения
Применение..... 255
Общие принципы..... 255
Выбор подшипников качения..... 256
Расчет наибольшего допустимого давления..... 258
Зубчатые передачи (эвольвентные)..... 260
Определения..... 260
Зубчатая передача стартера..... 264
Стандарты зубчатых передач США..... 264
Расчет наибольшего допустимого давления..... 265
Ременные передачи..... 270
Фрикционные ременные передачи..... 270
Зубчато-ременные передачи..... 274
Цепные передачи..... 278
Обзор..... 278
Конструкции цепей..... 278
Звездочки..... 280
Натяжители и успокоители цепей..... 281

Способы соединения деталей

Разъемные соединения..... 282
Позитивные или геометрически замкнутые соединения..... 282
Фрикционные соединения..... 286
Резьбовые крепежные детали..... 292
Защелкивающиеся соединения пластмассовых деталей..... 302
Неразъемные соединения..... 304
Сварка..... 304
Пайка..... 308
Клеевые соединения..... 309
Заклепочные соединения..... 310

Соединение методом принудительной деформации 312

Физика автомобиля

Автомобилестроение, основные термины 314
Поведение автомобиля, основные термины 314
Динамика автомобиля 324
Динамика прямолинейного движения 324
Сцепление шины с дорогой 329
Ускорение и торможение 331
Действия: реакции, торможение и остановка автомобиля 331
Обгон 333
Расход топлива 335
Динамика поперечного перемещения 338
Специальные динамические характеристики грузовых автомобилей 344
Методики динамических испытаний в соответствии со стандартами ISO 348
Аэродинамика 354
Аэродинамические параметры 354
Автомобильные аэродинамические трубы 355
Акустика автомобиля 360
Измерение уровня шума и предельные значения для автомобилей в соответствии с требованиями законодательства 360
Инженерная акустика 361
Акустическое проектирование 362

Двигатели внутреннего сгорания

Двигатели внутреннего сгорания 366
Тепловые двигатели 366
Рабочие циклы двигателя 368
Реальные циклы 373
Образование смеси, процесс сгорания, токсичные выбросы 376
Двигатель с искровым зажиганием 376
Дизельный двигатель 386
Смешанные формы и альтернативные стратегии управления 390
Цикл подачи заряда смеси в цилиндр и наддув 392
Газообмен 392
Регулирование фаз газораспределения 394
Процессы наддува 399
Система рециркуляции отработавших газов 403
Двигатель с возвратно-поступательным движением поршней 404
Компоненты 404
Типы двигателей с возвратно-поступательным движением поршней 418
Конструкция коленчатого вала 419
Трибология и трение 427
Эмпирические и расчетные параметры 431
Роторный двигатель Ванкеля 442
Конструкция и принцип действия 442
Характеристики роторного двигателя 445
Система охлаждения двигателя 446
Воздушное охлаждение 446
Жидкостное охлаждение 446
Промежуточное охлаждение (охлаждение с наддувом воздуха) 450
Охлаждение масла и топлива 451
Технология модульного охлаждения 452
Технология систем охлаждения 453
Интеллектуальные системы теплового регулирования 453
Охлаждение отработавших газов 455
Система смазки двигателя 456
Система принудительной смазки двигателя 456
Компоненты 456
Фильтрация воздуха 459
Загрязняющие воздух примеси 459
Воздушные фильтры (воздухоочистители) 459
Турбокомпрессоры и нагнетатели 462
Нагнетатели с механическим приводом 462
Нагнетатели, приводимые волновым давлением газа 465
Турбокомпрессоры 467
Комплексные системы турбонаддува 475
Система выпуска отработавших газов 480
Конструкция и назначение 480
Выпускной коллектор 481
Каталитический нейтрализатор отработавших газов 482
Сажевый фильтр 483
Глушители 483
Соединительные элементы 485
Устройства, задающие акустические параметры глушителей 486
Системы выпуска отработавших газов коммерческих автомобилей 487

Нормы контроля и диагностики токсичности отработавших газов
Нормы контроля токсичности отработавших газов ... 488
Обзор ... 488
Стандарт CARB (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили) ... 489
Стандарт EPA (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили) ... 493
Стандарт ЕС (легковые и малотоннажные грузовые автомобили) ... 495
Стандарт Японии (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили) ... 498
Стандарт США (большегрузные грузовые автомобили) ... 499
Стандарт ЕС (большегрузные грузовые автомобили) ... 501
Стандарт Японии (большегрузные грузовые автомобили) ... 502
Испытательные циклы, принятые в США (легковые автомобили и малотоннажные грузовые автомобили) ... 504
Европейские циклы испытаний (для легковых автомобилей/малотоннажных грузовых автомобилей) ... 506
Японские циклы испытаний (для легковых автомобилей/малотоннажных грузовых автомобилей) ... 506
Испытательные циклы для большегрузных грузовых автомобилей ... 507
Техника измерения концентраций составляющих отработавших газов ... 510
Испытания на токсичность отработавших газов на стенде с беговыми барабанами ... 510
Аппаратура для измерения концентраций токсичных веществ в отработавших газах ... 513
Определение дымности выхлопа дизельных двигателей ... 516
Испытания на выделение паров топлива ... 518
Диагностика ... 520
Введение ... 520
Мониторинг во время движения ... 520
Системы бортовой диагностики (OBD) ... 521
Функции систем OBD ... 526
Требования к системам OBD большегрузных грузовых автомобилей ... 529
Диагностика в мастерской ... 531
Диагностические функции ECU и информационная система ... 533

Системы управления двигателем с искровым зажиганием
Системы управления двигателем с искровым зажиганием ... 534
Описание системы управления двигателем ... 534
Обзор системы ... 535
Версии системы Motronic ... 539
Заряд смеси в цилиндре ... 542
Компоненты ... 542
Регулирование заряда воздуха ... 542
Подача топлива ... 546
Системы подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод ... 546
Системы подачи топлива с прямым впрыском топлива ... 547
Система улавливания паров топлива ... 549
Топливный фильтр ... 550
Электроприводные топливные насосы ... 551
Насосы высокого давления для систем прямого впрыска топлива ... 553
Топливная рампа ... 557
Регулятор давления топлива ... 557
Демпфер пульсаций давления топлива ... 558
Образование смеси ... 559
Основные принципы ... 559
Системы смесеобразования ... 560
Система с впрыском топлива во впускной трубопровод ... 561
Системы прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей ... 563
Компоненты системы смесеобразования ... 565
Зажигание ... 570
Основные принципы ... 570
Момент зажигания ... 571
Системы зажигания ... 575
Катушка зажигания ... 577
Свеча зажигания ... 581
Каталитический нейтрализатор отработавших газов ... 586
Каталитическая очистка отработавших газов ... 586
λ-регулирование ... 590

Работа двигателя на альтернативных видах топлива
Работа двигателя на сжиженном нефтяном газе ... 592
Применение ... 592
Конструкция ... 592
Работа двигателей на сжиженном нефтяном газе ... 594
Работа двигателя на сжатом природном газе ... 596
Применение ... 596
Конструкция ... 596
Компоненты ... 599

Системы управления дизельными двигателями
Управление работой дизельного двигателя ... 602
Описание системы управления двигателем ... 602
Электронная система управления дизельным двигателем ... 603
Система подачи топлива (ступень низкого давления) ... 606
Подача топлива ... 606
Система фильтрации топлива ... 610
Система впрыска топлива Common Rail ... 612
Обзор системы ... 612
Форсунки ... 616
Насосы высокого давления ... 621
Топливная рампа ... 625
Насос-форсунки с клапанным регулированием цикловой подачи ... 626
Система насос-форсунок для легковых автомобилей ... 626
Насос-форсунки для коммерческих автомобилей ... 627
Система индивидуальных ТНВД для коммерческих автомобилей ... 628
Компоненты ... 629
Дизельные распределительные топливные насосы высокого давления ... 630
Аксиально-поршневые распределительные насосы ... 630
Радиально-поршневые распределительные насосы ... 633
Система впрыска топлива ... 634
Вспомогательные пусковые устройства ... 636
Системы предпускового подогрева ... 636
Очистка отработавших газов ... 639
Каталитические нейтрализаторы ... 639
Сажевый фильтр ... 642

Альтернативные виды привода
Гибридные приводы ... 646
Характеристики ... 646
Функции ... 647
Функциональная классификация ... 648
Конфигурации привода ... 649
Системы управления гибридными приводами ... 654
Рекуперативная система торможения ... 657
Топливные элементы для привода автомобилей ... 658
Принцип действия ... 658
Принцип действия системы топливных элементов ... 660
Принцип действий привода ... 662

Трансмиссия
Трансмиссия ... 664
Элементы трансмиссии ... 665
Сцепления и муфты ... 666
Многоступенчатые коробки передач ... 669
Механические коробки передач ... 670
Автоматические коробки передач ... 672
Бесступенчатые коробки передач ... 678
Главная передача ... 679
Полноприводный автомобиль ... 681

Системы шасси
Системы шасси ... 684
Базовые принципы ... 684
Подвеска ... 694
Базовые принципы ... 694
Типы пружин ... 697
Системы подвесок ... 702
Амортизаторы и вибропоглотители ... 706
Амортизаторы ... 706
Вибропоглотители ... 712
Подвеска колес ... 714
Базовые принципы ... 714
Кинематика и эластокинематика ... 714
Основные категории подвесок колес ... 716
Колеса ... 722
Колеса легковых автомобилей ... 722
Колеса грузовых автомобилей ... 728
Шины ... 732
Классификация шин ... 732
Конструкция шины ... 732
Маркировка шин ... 734
Применение шин ... 737
Сцепление шины с дорогой ... 739
Система контроля давления в шинах ... 746
Рулевое управление ... 748
Определения для систем рулевого управления ... 748

Требования к системе рулевого управления ... 748
Типы рулевых механизмов ... 750
Рулевое управление с усилителем для легковых автомобилей ... 751
Рулевое управление с усилителем для грузовых автомобилей ... 757
Тормозные системы ... 760
Определения и принципы работы ... 760
Законодательные нормы ... 765
Конструкции тормозных систем легковых автомобилей ... 776
Рабочая тормозная система ... 776
Электромеханическая тормозная система ... 778
Электрогидравлический тормоз ... 780
Назначение и функции ... 780
Конструкция ... 782
Принцип действия ... 782
Тормозные системы для коммерческих автомобилей ... 784
Характеристика системы ... 784
Компоненты тормозных систем коммерческих автомобилей ... 787
Тормозная система с электронным управлением ... 794
Вспомогательные тормозные системы ... 798
Колесные тормоза ... 802
Дисковые тормоза ... 802
Барабанные тормозные механизмы ... 804

Управление шасси и активная безопасность

Антиблокировочная система тормозов ... 806
Функции и требования ... 806
Принципы действия ... 806
Варианты систем ABS ... 810
Примеры систем ABS ... 812
Антиблокировочная тормозная система для коммерческих автомобилей ... 814
Система управления тяговым усилием ... 818
Функции и требования ... 818
Регулирующие контуры системы управления тяговым усилием (TCS) ... 818
Система динамической стабилизации ... 822
Функции ... 822
Требования ... 823
Принцип действия ... 824
Типичный маневр ... 824
Структура системы ... 825
Компоненты программы ... 834
Специальная система динамической стабилизации для коммерческих автомобилей ... 837
Дополнительные функции (автоматические операции тормозной системы) ... 842
Интегрированные системы управления динамикой движения ... 846
Обзор ... 846
Функции ... 846
Архитектура системы ... 849

Автомобильные кузова

Систематизация транспортных средств ... 852
Классификация ... 853
Автомобильные кузова (легковые автомобили) ... 854
Основные размеры ... 854
Конструкция кузова ... 856
Аэродинамика ... 857
Аэроакустика ... 859
Кузов ... 860
Безопасность ... 864
Кузова транспортных средств (коммерческие автомобили) ... 868
Классификация ... 868
Коммерческие автомобили средней и большой грузоподъемности и автомобили-тягачи ... 869
Автобусы ... 872
Пассивная безопасность грузовых автомобилей ... 874
Освещение ... 876
Функции ... 876
Правила, стандарты и оборудование ... 877
Источники света ... 878
Функции фар ... 879
Функции основного освещения для Европы ... 882
Функции основного освещения для США ... 885
Термины и определения ... 887
Варианты конструкции фар ... 888
Установка светосигнальных ламп, правила их использования ... 899
Варианты конструкций фонарей ... 903
Регулировка фар ... 907
Регулировка света фар ... 908
Автомобильные ветровые и боковые стекла ... 914
Свойства стекла ... 914
Остекление автомобилей ... 915
Функции остекления ... 916
Очистка ветрового и заднего стекол и фар ... 920

Системы очистителей ветрового стекла ... 920
Системы стеклоочистителей заднего стекла ... 926
Системы омывателей ветрового и заднего стекол ... 927
Системы стеклоомывателей фар ... 927

Пассивная безопасность автомобиля
Системы безопасности водителя и пассажиров ... 928
Ремни безопасности и натяжные устройства ремней безопасности ... 928
Подушка безопасности ... 931
Системы защиты при опрокидывании автомобиля ... 934
Компоненты ... 934
Перспективные разработки ... 936

Системы охраны автомобилей
Системы замков ... 938
Функция ... 938
Конструкция (на примере боковой двери) ... 939
Функции двойного запирания ... 941
Технологии ... 945

Охранные автомобильные системы
Противоугонные системы ... 946
Нормы и правила ... 946
Конструкция системы ... 946

Автомобильное электрооборудование
Автомобильное электрооборудование ... 948
Источники электрического тока ... 948
Схемы бортовой сети ... 953
Параметры бортовой сети ... 955
Управление электроэнергией ... 957
Стартерные аккумуляторные батареи ... 962
Требования ... 962
Конструкция аккумуляторной батареи ... 963
Заряд и разряд ... 964
Характеристики аккумуляторных батарей ... 965
Типы аккумуляторных батарей ... 966
Эксплуатация аккумуляторной батареи ... 968
Электрические двигатели ... 970
Систематика роторных электрических машин ... 970
Двигатели постоянного тока ... 970
Асинхронный электродвигатель ... 975
Синхронный электродвигатель ... 977
Система трехфазного тока ... 982
Генераторы переменного тока ... 986
Генерирование электроэнергии ... 986
Условия работы ... 991
Коэффициент полезного действия ... 992
Типы генераторов с клювообразными полюсами ... 993
Системы пуска двигателей ... 996
Стартер ... 996
Включение стартера ... 1000
Исполнительные механизмы ... 1002
Обзор ... 1002
Электродинамические и электромагнитные преобразователи ... 1002
Пьезоэлектрические исполнительные механизмы ... 1005
Гидромеханические исполнительные механизмы ... 1007
Жгуты проводов и соединители ... 1008
Жгуты проводов ... 1008
Штекерные соединители ... 1010
Электромагнитная совместимость и подавление помех ... 1014
Требования ... 1014
Источники помех ... 1014
Потенциально чувствительные устройства ... 1017
Передача помех ... 1018
Электростатический разряд ... 1019
Методы измерения ... 1019
Правила и стандарты ... 1021
Символы и электрические схемы ... 1022
Символы электрических схем ... 1022
Электрические схемы ... 1029
Обозначения выводов ... 1041

Автомобильная электроника
Разработка автомобильного программного обеспечения ... 1044
Мотивация ... 1044
Структура программного обеспечения в автомобилях ... 1045
Важные стандарты для автомобильного программного обеспечения ... 1045
Процесс разработки ... 1048
Контроль качества при разработке программного обеспечения ... 1052
Процессы разработки программного обеспечения для автомобилей ... 1052
Моделирование и имитация программных функций ... 1054
Проектирование и реализация программных функций ... 1057
Интеграция и тестирование программного обеспечения и ЭБУ ... 1058

Калибровка программных функций ... 1060
Перспективы ... 1061
Объединение автомобильных систем в сеть ... 1064
Системы шин ... 1064
Технические принципы ... 1065
Шины в автомобилях ... 1071
CAN ... 1071
FlexRay ... 1075
LIN ... 1079
Ethernet, прототип Internet ... 1082
PSI5 ... 1083
Шина MOST ... 1085
Архитектура электронных систем ... 1090
Обзор ... 1090
Архитектура электронных систем ... 1093
Датчики ... 1100
Базовые принципы ... 1100
Датчики положения ... 1105
Датчики скорости и частоты вращения ... 1121
Датчики ускорения и вибрации ... 1126
Датчики давления ... 1130
Расходомеры ... 1134
Газовые датчики, датчики концентрации ... 1137
Датчики температуры ... 1140
Датчики силы и момента ... 1143
Оптоэлектронные датчики ... 1150
Датчики для систем повышения безопасности при движении (DAS) ... 1154
Мехатроника ... 1164
Мехатронные системы и компоненты ... 1164
Методология разработки ... 1165
Перспективы ... 1168

Системы комфорта и удобства эсплуатации

Управление климатом в салоне ... 1170
Требования к управлению климатом ... 1170
Конструкция и принцип работы кондиционера ... 1170
Системы управления климатом ... 1173
Управление климатом в гибридных автомобилях и электромобилях ... 1174
Вспомогательные отопительные системы ... 1176
Системы комфорта и удобства эсплуатации в дверях и потолке ... 1180
Приводы стеклоподъемников ... 1180
Системы люков в крыше ... 1181
Функции для комфорта и удобства эксплуатации в салоне ... 1182
Электрическая регулировка сидений ... 1182

Пользовательские интерфейсы, дистанционная обработка данных и мультимедийные системы

Дисплеи и органы управления ... 1184
Каналы обмена информацией ... 1184
Контрольно-измерительные приборы ... 1185
Прием радио- и телесигнала в автомобиле ... 1192
Беспроводная передача сигнала ... 1192
Радиоприемники ... 1195
Транспортная служба видеоинформационной связи ... 1199
Регистрирующая аппаратура ЕС ... 1200
Законодательные нормы ... 1200
Конструктивные особенности ... 1200

Системы повышения безопасности дорожного движения

Системы повышения безопасности дорожного движения ... 1202
Системы парковки автомобилей ... 1206
Вспомогательное средство парковки с ультразвуковыми датчиками ... 1206
Помощник при парковке ... 1209
Автомобильная навигация ... 1210
Навигационные системы ... 1210
Функции навигации ... 1210
Цифровая карта ... 1213
Адаптивный круиз-контроль ... 1214
Функция ... 1214
Конструкция и функция ... 1214
Алгоритмы управления ... 1216
Сфера применения и перспективы новых разработок ... 1217
Предсказывающие системы экстренного торможения ... 1220
Системы повышения безопасности на основе видео ... 1222
Предупреждение о сходе с полосы движения и помощь в удержании на полосе движения ... 1222
Опознавание дорожных знаков ... 1223
Системы ночного видения ... 1224
Применение ... 1224
Системы дальней инфракрасной области спектра ... 1224
Системы ближней инфракрасной области спектра ... 1225

Алфавитный указатель ... 1228

Указатель сокращений ... 1259

Авторы

Если не указано иное,
авторы Справочника являются сотрудниками
Robert Bosch GmbH.

Базовые физические принципы
Величины и единицы измерения
Prof. Dr. rer. nat. Susanne Schandl,
Duale Hochschule Baden-Württemberg,
Ravensburg, Campus Friedrichshafen.

Основные уравнения, применяемые в механике
Prof. Dr.-Ing. Horst Haberhauer,
Hochschule Esslingen.

Колебания и вибрации
Dipl.-Ing. Sebastian Loos,
Rheinisch-Westfalische
Technische Hochschule (RWTH) Aachen.

Акустика
Dipl.-Ing. Hans-Martin Gerhard,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach.

Гидростатика, механика жидкостей и газов
Prof. Dr.-Ing. Horst Haberhauer,
Hochschule Esslingen.

Термодинамика
Dr.-Ing. Thomas Koch,
Daimler AG, Stuttgart;
Dipl.-Ing. Heijo Oelschlegel,
Daimler AG, Stuttgart.

Электротехника
Dr.-Ing. Hans Roßmanith,
Friedrich-Alexander-Universitat
Erlangen-Nurnberg.

Электроника
Prof. Dr.-Ing. Klemens Gintner,
Hochschule Karlsruhe – Technik und
Wirtschaft;
Dr. rer. nat. Ulrich Schaefer;
Dipl.-Ing. Axel Aue.

Электрохимия
Prof. Dr.-Ing. Matthias E. Rebhan,
Hochschule Munchen.

Математика и математические методы
Математика
Prof. Dr.-Ing. Matthias E. Rebhan,
Hochschule München.

Метод конечных элементов
Prof. Dipl.-Ing. Peter Groth,
Hochschule Esslingen.

Автоматическое управление
Dr.-Ing. Wolf-Dieter Gruhle,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen.

Материалы
Химические элементы, вещества, материалы
Dr rer. nat. Jorg Ullmann;
OStR Karl Manfred Erhardt,
Robert-Bosch-Schule, Stuttgart;
Dr. rer. nat. W. Draxler;
Dipl.-Ing. Friedrich Mühleder;
Dipl.-Ing. Dieter Scheunert,
Daimler AG, Sindelfingen;
Dr. rer. nat. I. Brauer;
Franz Wetzl;
Dr. rer. nat. H.-J. Spranger;
Dipl.-Ing. Gert Lindemann;
Dipl.-Ing. (FH) W. Hasert;
Dipl.-Ing. Hans Schneider;
Dr. rer. pol. T. Lueb,
BASF Coatings AG, Munster.

Термическая обработка металлов
Dr.-Ing. Jochen Schwarzer.

Коррозия и защита от коррозии
Dipl.-Chem. Brigitte Moro.

Осаждения и покрытия
Dr. rer. nat. Manfred Rossler;
Dr. rer. nat. Ullrich Kraatz;
Dr. rer. nat. Christoph Treutler.

Рабочие жидкости
Смазочные материалы
Dr. rer. nat. Gerd Dornhöfer.

Топливо
Dr. rer. nat. Jörg Ullmann;
Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Allgeier.

Тормозная жидкость, охлаждающие жидкости
Dipl.-Ing. (FH) Liesetotte Habe-Rapf.

Детали автомобиля
Пружины
Prof. Dr.-Ing. Horst Haberhauer,
Hochschule Esslingen.

Подшипники скольжения
W. Bickle,
KS Gleitlager GmbH.

Роликовые подшипники
Dr.-Ing. Zhenhuan Wu.

Зубчатые передачи
Dipl.-Ing. Uwe von Ehrenwall.

Ременные передачи
Dipl.-Ing. Wolfgang Korfer,
Gates GmbH, Aachen.

Цепные приводы
Dr.-Ing. Thomas Fink,
IWIS Ketten, Joh. Winklhofer & Söhne GmbH & Co. KG, München.

Способы соединения деталей
Разъемные соединения
Prof. Dr.-Ing. Horst Haberhauer,
Hochschule Esslingen;
Dipl.-Ing. Rolf Bald.

Неразъемные соединения
Dr.-Ing. Knud Norenberg,
Volkswagen AG, Wolfsburg.

Физика транспортных средств
Основные компоненты автомобилестроения
Prof. Dr. rer. nat. Ludger Dragon,
Daimler AG, Sindelfingen.

Динамика автомобиля
Dipl.-Ing. Marc Birk,
Daimler AG, Stuttgart;
Prof. Dr. rer. nat. Ludger Dragon,
Daimler AG, Sindelfingen;
Dr.-Ing. Rupert Niethammer,
Daimler AG, Stuttgart;
Dipl.-Ing. Imre Boros,
Daimler AG, Stuttgart.
Dipl.-Ing. Klaus Wust,
Daimler AG, Stuttgart.

Аэродинамика
Dipl.-Ing. M. Preiß.
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach.

Автомобильная акустика
Dipl.-Ing. Hans-Martin Gerhard,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach.

Двигатели внутреннего сгорания
Двигатели внутреннего сгорания, формирование смеси, зарядный цикл и наддув, двигатель с возвратно-поступательным поршнем
Dipl.-Ing. Heijo Oelschlegel,
Daimler AG, Stuttgart;
Dr.-Ing. Thomas Koch,
Daimler AG, Stuttgart;
Prof. Dr.-Ing. Klaus Binder,
Daimler AG, Stuttgart.

Роторный двигатель Ванкеля
Heinrich Ackers,
Fachhochschule Koln,
Institut für Fahrzeugtechnik;
Sascha Heimchen,
Fachhochschule Koln,
Institut für Fahrzeugtechnik;
Dipl.-Ing. (FH) Jochen Munzinger,
Mazda Motors (Deutschland) GmbH.

Система охлаждения двигателя
Dipl.-Ing. Stefan Rogg,
Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart.

Система смазки двигателя
Dipl.-Ing. Markus Kolczyk,
Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg.

Фильтрация воздуха
Dr.-Ing. Michael Durst,
Filterwerk Mann + Hummel, Ludwigsburg.

Турбокомпрессоры и нагнетатели для ДВС
Dr.-Ing. Stefan Münz,
Bosch Mahle Turbo Systems
GmbH & Co. KG, Stuttgart.

Система выпуска отработавших газов
Dr. rer. nat. Rolf Jebasinski,
J. Eberspacher GmbH & Co. KG,
Esslingen.

Законодательные нормы предотвращения выбросов в атмосферу и диагностики
Законодательные нормы предотвращения выбросов в атмосферу
Dr.-Ing. Matthias Tappe;
Dipl.-Ing. Michael Bender.

Методы измерения параметров выхлопных газов
Dipl.-Phys. Martin-Andreas Drühe;
Dipl.-Ing. Andreas Kreh;
Dipl.-Ing. Bernd Hinner;
Dr.-Ing. Matthias Tappe.

Диагностика
Dr.-Ing. Markus Willimowski;
Dr.-Ing. Günter Driedger;
Dr. rer. nat. Hauke Wendt;
Dr.-Ing. Michael Hackner;
Dorothee Amann;
B. Eng. Varun Suri.

Управление двигателя с искровым зажиганием
Управление двигателя с искровым зажиганием
Dipl.-Ing. Armin Hassdenteufel.

Заряд смеси в цилиндре
Dr. rer. nat. Dirk Hofmann.

Подача топлива
Dipl.-Ing. Jens Wolber;
Manfred Franz;
Dr.-Ing. Thomas Kaiser;
Dipl.-Ing. Uwe Müller;
Dipl.-Ing. (FH) Horst Kirschner.

Смесеобразование
Dipl.-Ing. Andreas Binder;
Dipl.-Ing. Markus Gesk;
Dipl.-Ing. Andreas Glaser.

Зажигание
Dipl.-Ing. Walter Gollin;
Dipl.-Ing. Werner Haming;
Dipl.-Ing. Tim Skowronek;
Dipl.-Ing. Erich Breuser;
Dr.-Ing. Grit Vogt.

Каталитическая очистка отработавших газов
Dipl.-Ing. Klaus Winkler;
Dipl.-Ing. Detlef Heinrich.

Альтернативные двигатели с внешним смесеобразованием
Работа двигателя на СНГ
Dipl.-Ing. Iraklis Avramopoulos,
IAV GmbH, Berlin.

Двигатели, работающие на природном газе
Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Allgeier.

Управление работой дизельного двигателя
Управление работой дизельного двигателя
Dipl.-Ing. Felix Landhaußer.

Система подачи топлива (ступень низкого давления)
Dipl.-Ing. Klaus Krieger
Dr.-Ing. Thomas Kaiser.

Система впрыска Common Rail
Dipl.-Ing. Felix Landhaußer;
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Rettich;
Dipl.-Ing. Thilo Klam;
Dr.-Ing. Holger Rapp;
Dipl.-Ing. Adrian Jacob;
Dr.-Ing. Dietmar Ottenbacher;
Ing. Herbert Strahberger.

Насос-форсунки с клапанным регулированием цикловой подачи
Dipl.-Ing. Klaus Krieger.

Дизельные распределительные топливные насосы
Dipl.-Ing. (BA) Jürgen Crepin;
ETAS GmbH, Stuttgart.

Вспомогательные пусковые устройства
Dipl.-Ing. (FH) Michael Wehleit;
Dr. rer. nat. Wolfgang Dreßler.

Очистка отработавших газов
Dipl.-Ing. Stefan Stein;
Dr. rer. nat. Thomas Hauber;
Dr.-Ing. Ralf Wirth.

Альтернативные приводные установки
Гибридные приводы
Dipl.-Ing. Thomas Huber.

Топливные элементы
Dr.-Ing. Gunter Wiedemann;
Dr. rer. nat. Ulrich Gottwick;
Dipl.-Ing. (FH) Jan-Michael Grahn.

Трансмиссия
Трансмиссия
Dipl.-Ing. Peter Kopf,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen;
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Muller.

Системы ходовой части
Системы ходовой части, подвеска
Dipl.-Ing. Maciej Foltanski,
Rheinisch-Westfalische
Technische Hochschule (RWTH) Aachen.

Амортизаторы и демпферы, колесная подвеска
Dipl.-Ing. Jorn Lützow,
Rheinisch-Westfalische
Technische Hochschule (RWTH) Aachen.

Колеса
Ing. (grad.) Dieter Renz,
Daimler AG, Sindelfingen;
Dipl.-Hdl. Martin Bauknecht,
MAN Nutzfahrzeuge Gruppe.

Шины
Dipl.-Ing. B. Meiß,
Continental AG, Hannover;
Prof. Dr.-Ing. habil. E.-C. v. Glasner,
Daimler AG, Stuttgart.

Система контроля давления в шинах
Dipl.-Ing. Norbert Polzin.

Рулевое управление
Dipl.-Ing. Peter Brenner,
ZF Lenksysteme GmbH,
Schwabisch Gmünd.

Тормозные системы
Dr. rer. nat. Jurgen Brauninger;
Werner Schneider.

Тормозные системы для легковых автомобилей
Werner Schneider.

Электрогидравлический тормоз
Dipl.-Ing. Bernhard Kant.

Тормозные системы для грузовых автомобилей полной массой свыше 7,5 т
Werner Schneider;
Dr.-Ing. Dirk Huhn,
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen.

Колесные тормоза
Werner Schneider.

Системы управления ходовой части и активная безопасность
Антиблокировочная система
Dipl.-Ing. (FH) Alfred Strehle;
Werner Schneider;
Dipl.-Ing. Frank Schwab,
Knorr-Bremse SfN, Schwieberdingen.

Система управления тяговым усилием
Werner Schneider.

Система контроля динамики движения
Dr.-Ing. Gero Nenninger;
Dipl.-Ing. (FH) Jochen Wagner;
Dr.-Ing. Falk Hecker,
Knorr-Bremse SfN, Schwieberdingen.

Интегрированные системы контроля динамики движения
Dr.-Ing. Michael Knoop.

Автомобильные кузова
Систематизация автотранспортных средств, Автомобильные кузова (легковые автомобили)
Dipl.-Ing. Dieter Scheunert,
Daimler AG, Sindelfingen.

Кузова транспортных средств (грузовые автомобили)
Dipl.-Ing. Uwe Schon,
Daimler AG, Stuttgart.

Устройства освещения
Dr.-Ing. Michael Hamm,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH;
Dipl.-Ing. Doris Boebel,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH;
Dipl.-Ing. Tilman Spingler,
Automotive Lighting Reutlingen GmbH.

Автомобильные ветровые и боковые стекла
Dipl.-Kauffr. (FH) Britta Muller,
Saint-Gobain Sekurit International,
Herzogenrath.

Ветровое стекло, заднее стекло и система очистки головной оптики
Dr.-Ing Mario Husges,
Dipl.-Ing. Florian Hauser.

Пассивная безопасность автомобиля
Системы безопасности пассажиров
Dr. rer. nat. Alfred Kuttenberger.

Системы безопасности автомобиля
Системы блокировки
Dr.-Ing. Bernhard Kordowski,
Kiekert AG, Heiligenhaus.

Противоугонные системы
Dipl.-Ing. (FH) U. Gotz.

Автомобильная электрика
Автомобильная система электрооборудования
Dipl.-Ing. Clemens Schmucker,
Dipl.-Ing. Markus Beck.

Аккумуляторные стартерные батареи
Dipl.-Ing. Ingo Koch,
VB Autobatterie GmbH & Co. KGaA,
Hannover

Электрические машины
Prof. Dr.-Ing. Jurgen Ulm,
Reinhold-Wurth-Hochschule, Kunzelsau

Генераторы переменного тока
Dipl.-Ing. Reinhard Meyer.

Системы пуска двигателей
Dipl.-Ing. C. Krondorfer;
Dr.-Ing. Ingo Richter.

Исполнительные механизмы
Dr.-Ing. Rudolf Heinz;
Dr.-Ing. Thomas Hennige.

Электропроводка и соединители электрических проводов
Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Kircher;
Dipl.-Ing. Werner Hofmeister;
Dipl.-Ing. Andreas Simmel.

Электромагнитная совместимость
Dr.-Ing. Wolfgang Pfaff.

Обозначения и электрические схемы
Editorial staff.

Автомобильная электроника
Автомобильное программное обеспечение
Dipl.-Ing. (BA) Jürgen Crepin;
ETAS GmbH, Stuttgart;
Dr. rer. nat. Kai Pinnow,
ETAS GmbH, Stuttgart;
Dipl.-Ing. Jörg Schauffele,
ETAS GmbH, Stuttgart.

Автомобильные компьютерные и шинные системы
Dr. rer. nat. Harald Weiler;
Dr.-Ing. Tobias Lorenz;
Dipl.-Ing. Oliver Prelle.

Архитектура электронных систем
Dr.-Ing. Wolfgang Stolz;
Dipl.-Ing. (FH) Tino Sommer.

Датчики
Dr.-Ing. Erich Zabler;
Dipl.-Ökon. Frauke Ludmann;
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Мехатроника
Dipl.-Ing. Hans-Martin Heinkel;
Dr.-Ing. Klaus-Georg Burger.

Системы комфорта и удобства эсплуатации
Салонная система климат-контроля
Dipl.-Ing. Peter Kroner,
Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart;
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Feith,
Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart;
Dipl.-Ing. Günter Eberspach,
J. Eberspacher GmbH & Co. KG,
Esslingen.

Системы комфорта и удобства в районе дверей и крыши
Dipl.-Ing. (FH) Walter Haußecker;
Dipl.-Ing. (FH) Siegfried Reichmann.

Функции комфорта и удобства в пассажирском салоне
Dipl.-Ing. (FH) Reiner Birkert.

Пользовательские интерфейсы, дистанционная обработка данных и мультимедийные системы
Дисплеи и органы управления
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Автомобильные радио и ТВ системы
Dr.-Ing. Jens Passoke.

Транспортная служба видеоинформационной связи
Dipl.-Ing. Ernst Peter Neukirchner.

Регистрирующая аппаратура ЕС
Continental Automotive, Frankfurt.

Системы повышения безопасности при движении (DAS)
Системы повышения безопасности при движении (DAS)
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Системы парковки автомобилей
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Автомобильная навигация
Dipl.-Ing. Ernst Peter Neukirchner.

Адаптивный круиз-контроль
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll;
Dr.-Ing. Falk Hecker,
Knorr-Bremse SfN, Schwieberdingen.

Превентивные системы аварийного торможения, видеосистемы повышения безопасности при движении
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Системы ночного видения
Prof. Dr.-Ing. Peter Knoll.

Величины и единицы измерения

Для того чтобы можно было выражать физические величины через разные их значения, требуется система единиц, которая служила бы критерием для каждого измерения. Таким критерием является система СИ, принятая в 1960 году на 11-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ), в работе которой участвовали представители более 50 стран. В Германии использование единиц измерения по закону находится под контролем Национального метрологического института Германии.

Дополнительные единицы измерения, которые по сей день широко используются (например, литр, тонна, час, градус Цельсия), не допускаются к использованию по закону и упоминаются здесь как внесистемные.

Единицы измерения, разрешенные в некоторых странах (например, дюйм, унция, градус Фаренгейта) или устаревшие, рассматриваются в отдельном разделе.

Международная система единиц (СИ)

Система СИ (SI: «Systeme International d'Unites» – Международная система единиц) изложена в ISO 31 и ISO 1000 (ISO: International Organization for Standardization – Международная организация по стандартизации), а для Германии в DIN 1301 (DIN: Deutsches Institut für Normung – Немецкий институт стандартизации).

Таблица 1. Единицы СИ

Величина	Обозначение величины	Единицы СИ	
		Наименование	Обозначение
Длина	*l*	метр	м
Масса	*m*	килограмм	кг
Время	*t*	секунда	с
Сила электрического тока	*I*	ампер	А
Термодинамическая температура	*T*	кельвин	К
Количество вещества	*n*	моль	моль
Сила света	*I*	кандела	кд

Система СИ включает семь основных единиц (табл. 1) и производные единицы, выражаемые через основные. Например, единица силы определяется из закона Ньютона через единицы длины и времени:

$$1 \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1 \text{ Н (Ньютон)}.$$

Производные единицы получаются из основных с использованием числового коэффициента 1. Существуют 22 производных единицы, которым, как и единице силы, присвоены собственные имена.

Определение основных единиц СИ

Перевод оригинального текста, написанного на французском языке, выделен курсивом (см. [1]).

1. Длина

1 метр равен расстоянию, которое проходит свет в вакууме за 1/299 792 458 секунды (XVII ГКМВ, 1983).

При определении метра используется скорость света в вакууме (c = 299 792 458 м/с), а не длина волны излучения в вакууме атома криптона ^{86}Kr, применяемая ранее. Первоначально метр определялся как сорокамиллионная часть земного меридиана (эталон метра, Париж, 1875).

2. Масса

1 килограмм равен массе международного эталона килограмма (I ГКМВ, 1889, III ГКМВ, 1901).

Платиноиридиевый прототип килограмма хранится в Международном бюро мер и весов в Севре близ Парижа, Франция. Национальный прототип килограмма в Германии хранится Национальном метрологическом институте в Брауншвейге.

3. Время

1 секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия ^{133}Cs (XIII ГКМВ, 1967).

Это определение относится к атому цезия в состоянии покоя при температуре 0 К. Такое измерение воспроизводится гораздо точнее, чем те, которые проводились ранее путем замера периодов обращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

4. Сила электрического тока

1 ампер равен силе постоянного электрического тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (IX ГКМВ, 1948).

Магитная постоянная, характеризующая создаваемое таким образом магнитное поле в вакууме, равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

5. Температура

1 кельвин равен 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды (X ГКМВ, 1954, XIII ГКМВ, 1967).

Нулевая точка шкалы Кельвина является нижним пределом температуры, называемым абсолютным нулем. Точка температурной шкалы, в которой все три состояния воды (жидкое, твердое, газообразное) находятся в равновесии друг к другу, соответствует температуре 273,16 К и давлению 611,657 Па.

6. Количество вещества

6.1. 1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в изотопе углерода ^{12}C массой 0,012 кг.

6.2. Структурными элементами моля могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны и другие частицы или группы частиц точно заданного состава (XIV ГКМВ, 1971).

В определении моля предполагается, что речь идет о массе покоя нейтрального атома углерода -12.

7. Сила света

1 кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, мощность излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт на стерадиан (XVI ГКМВ, 1979).

«Кандела» (лат.: свеча) раньше определялась как сила света, излучаемого абсолютно черным телом при температуре плавления платины.

Десятичные кратные и дольные единицы

Десятичные кратные и дольные единицы СИ образуются добавлением приставок к наименованиям единиц (например, миллиграмм) или обозначений приставок к обозначениям единиц (например, мг). Обозначение приставки ставится без пробела перед условным обозначением единицы. Не допускается применение приставок перед единицами: угла – градус, минута, секунда; времени – минута, час, день, год; температуры – градус Цельсия.

Таблица 2: Приставки

Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Наименование
	рус	лат.		
атто	а	a	10^{-18}	триллионная
фемто	ф	f	10^{-15}	тысячебиллионная
пико	п	p	10^{-12}	биллионная
нано	н	n	10^{-9}	миллиардная
микро	мк	μ	10^{-6}	миллионная
милли	м	m	10^{-3}	тысячная
санти	с	c	10^{-2}	сотая
деци	д	d	10^{-1}	десятая
дека	да	da	10^{1}	десять
гекто	г	h	10^{2}	сто
кило	к	K	10^{3}	тысяча
мега	М	M	10^{6}	миллион
гига	Г	G	10^{9}	миллиард[1)]
тера	Т	T	10^{12}	биллион[1)]
пета	П	P	10^{15}	тысяча биллионов
экса	Э	E	10^{18}	триллион

[1)] В США 10^9 = 1 биллион, 10^{12} = 1 триллион

Действующие единицы

Закон о единицах в метрологии от 22 февраля 1985 г., с изменениями от 29 октября 2001 года, и соответствующее постановление о их внедрении от 13 декабря 1985 г., с последними изменениями от 10 марта 2000 г. (по состоянию на 2004 г.), предусматривают использование действующих единиц в деловых и официальных соглашениях в Германии. К действующим единицам относятся:

- единицы СИ,
- десятичные кратные и дольные единицы;
- другие действующие единицы; см. таблицы на следущих страницах и в [2].

В следующих таблицах представлены данные в соответствии с DIN 1301.

Таблица 3. Действующие единицы

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		
1. Длина, площадь, объем					
Длина l	м		метр		
Площадь A	$м^2$		квадратный метр		
		а	ар	1 а = 100 $м^2$	
		га	гектар	1 га = 100 а = 10^4 $м^2$	
Объем V	$м^3$		кубический метр		
l, L			литр	1 л = 1 $дм^3$	
2. Угол					
(Плоский) угол [1] α, β	рад		радиан	1 рад [2] = 180°/π	1g (град) = 1 гон 1c (сотая минуты) = 1 сгон 1cc (сотая секунды) = 0,1 мгон
		°	градус	1° = π/180 рад	
		′	минута	1° = 60′ = 3600″	
		″	секунда		
		гон	гон	1 гон = π/200 рад	
Телесный угол [1] Ω	ср		стерадиан	1 ср [3]	

[1] При вычислениях радиан можно заменить числом 1

[2] 1 рад — угол, соответствующий дуге, длина которой равна ее радиусу.

[3] 1 ср — телесный угол, вырезающий на сфере, описанной вокруг вершины угла, поверхность, площадь которой равна квадрату радиуса сферы

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		

3. Масса

Масса (вес)[1] m	кг		килограмм		
		g	грамм	1 г = 10^{-3} кг	
		t	метрическая тонна	1 т = 10^{3} кг	
Плотность ρ	кг/м^3				Вес на единицу объема γ (кп/дм^3 или п/см^3) $\gamma = \rho \cdot g$
Момент инерции (момент массы, момент 2-го порядка) J	кг · м^2			$J = m \cdot r^2$ r = радиус вращения	Эффект маховика $G \cdot D^2$ в кп · м^2 $D = 2r$, $G = m \cdot g$ $G \cdot D^2 = 4J \cdot g$

4. Величины времени

Время, продолжительность, интервал[2] t	с		секунда		В энергетике один год принимается за 8760 часов
		мин	минута	1 мин = 60 с	
		ч	час	1 ч = 60 мин	
		сут	сутки	1 сут = 24 ч	
		г	год		
Частота f	Гц		герц	1 Гц = 1/с	
Частота вращения n	с$^{-1}$			с$^{-1}$ = 1/с	об/мин (оборот в минуту) разрешается применять для выражения частоты вращения; однако это обозначение лучше заменить на мин$^{-1}$ (1 об/мин = 1 мин$^{-1}$)
		мин$^{-1}$ 1/мин		1 мин$^{-1}$ = 1/мин = (1/60) с$^{-1}$	
Угловая частота ω	с$^{-1}$			$\omega = 2\pi f$	
Скорость v	м/с	км/ч		1 км/ч = (1/3,6) м/с	
Ускорение[3] a	м/с^2			ускорение свободного падения g = 9,80665 м/с^2	
Угловая скорость[4] ω	рад/с				
Угловое ускорение[4] α	рад/с^2				

[1] Термин «вес» в повседневном использовании имеет двойное значение: он обозначает как вес, так и массу (DIN 1305)

[2] Время в часах, минутах и секундах может записываться одной строкой, например, 3 ч 25 мин 6 с

[3] Ускорение иногда выражается в виде кратного ускорения свободного падения g

[4] При вычислениях радиан можно заменить числом 1

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		

5. Сила, энергия, мощность

Сила, вес F, G	Н		ньютон	1 Н = 1 кг · м/с^2	1 п (килопонд) = 9,80665 Н
Импульс силы p	Ns			1 Ns = 1 кг · м/с^2	
Давление, абсолютное давление p	Па		паскаль	1 Па = 1 Н/м^2	1 ат (техническая атмосфера) = 1 кп/см^2 = 0,980665 бар 1 атм (физическая атмосфера) = 1,01325 бар = 1013,25 гПа
		бар	бар	1 бар = 10^5 Па	
Механическое напряжение s, t	Н/м^2			1 Н/м^2 = 1 Па	1 кп/м^2 = 9,80665 Н/м^2
		Н/мм^2		1 Н/мм^2 = 1 МПа	
Твердость	Твердость по Бринеллю и Виккерсу больше не обозначается в кп/мм^2. Вместо этого аббревиатура шкалы твердости пишется как обозначение единицы после числовой величины, использовавшейся ранее (включая указание силы и т. д., где это применимо)				Пример. ***раньше*** ***сейчас*** HB = 350 кп/мм^2 350 HB HV30 = 720 кп/mm^2 720 HV30 HRC = 60 60 HRC
Энергия, работа E, W Теплота, количество теплоты[1] Q	Дж		джоуль	1 Дж = 1 Н · м = 1 Вт · с = 1 кг · м^2/с^2	1 ккал (килокалория) = 4.1868 кДж
		Вт · с	ватт-секунда	1 Вт · с = 1 Дж	
		кВт · ч	киловатт-час	1 кВт · ч = 3,6 МДж	
		эВ	электрон-вольт	1 эВ = 1,60219 · 10^{-19} Дж	
Момент силы M	Н · м		ньютон-метр		1 кп · м (килопондметр) = 9,80665 Н · м
Мощность P Тепловой поток Q Мощность ионизирующего излучения Φ	Вт		Ватт	1 Вт = 1 Дж/с = 1 Н · м/с	1 кп · м/с = 9,80665 Вт 1 л.с.[2] = 0, 7355 кВт 1 ккал/с = 4,1868 кВт 1 ккал/ч = 1,163 Вт
Полная электрическая мощность P_s	В А		вольт-ампер	1 В А = 1 Вт	
Реактивная электрическая мощность P_q	вар		вар	1 вар = 1 Вт	

6. Величины вязкости

Динамическая вязкость η	Па с		паскаль-секунда	1 Па с = 1 Н с/м^2 = 1 кг/(с · м)	1 П (пуаз) = 0,1 Па с
Кинематическая вязкость ν	м^2/с			1 м^2/с = 1 Па с (кг/м^3)	1 Ст (стокс) = 10^{-4} м^2/с

[1] Количество теплоты выражается в джоулях

[2] Л с – метрическая лошадиная сила

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		

7 Температура и теплота

Температура	T	К	кельвин		Θ = (T – 273,15 К) °С/К	
	Θ		°С	градус Цельсия		
Разница температур	ΔT	К		кельвин	1 К = 1 °С	В случае многозначных единиц разницу температур следует выражать в К
	$\Delta\Theta$		°С	градус Цельсия		

Количество теплоты и тепловой поток см. в разделе 5

Удельная теплоемкость (удельная теплота) c	Дж/(кг К)				1ккал/(кг К) = = 4,1868 кДж/(кг · К)
Молярная теплоемкость C	Дж/(моль К)				
Теплопроводность l	Вт/(м К)				1 ккал/(м ч К) = =1,163 Вт/(м · К)

8 Электрические величины

Электрический ток I	А		ампер		
Электрический потенциал (напряжение) U	В		вольт	1 В = 1 Вт/А	
Электрическая проводимость: проводимость G реактивная проводимость B полная проводимость Y	См		сименс	1 См = 1 А/В = 1/Ом	
Электрическое сопротивление сопротивление R реактивное сопротивление X полное сопротивление	Ом		ом	1 Ом = 1/См = 1 В/А	
Количество электричества, электрический заряд Q	Кл		кулон	1 Кл = 1 А с	
		А ч	ампер-час	1 А ч = 3600 Кл	
Электрическая емкость C	Ф		фарада	1 Ф = 1 Кл/В	

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		
Плотность электрического заряда, электрическое смещение D	Кл/м^2				
Напряженность электрического поля E	В/м				

9. Магнитные величины

Индуктивность L	Гн		генри	1 Гн = 1 Вб/А	
Магнитный поток F	Вб		вебер	1 Вб = 1 В · с	1 Мкс (максвелл) = 10^{-8} Вб
Плотность магнитного потока, магнитная индукция B	Тл	тесла		1 Тл = 1 Вб/м^2	1 Гс (гаусс) = 10^{-4} Тл
Напряженность магнитного поля H	А/м			1 А/м = 1 Н/Вб	1 Э (эрстед) = $10^3/(4\pi)$ А/м

10. Величины, применяемые в светотехнике

Сила света I	кд		кандела		
Яркость L	кд/м^2				1 сб (стильб) = 10^4 кд/м^2 1 асб (апостильб) = 1/π кд/м^2
Световой поток F	лм		люмен	1 лм = 1 кд · ср (ср – стерадиан)	1 Гс (гаусс) = 10^{-4} Тл
Освещенность E	лк		люкс	1 лк = 1 лм/м^2	1 Э (эрстед) = $10^3/(4\pi)$ А/м

11. Величины, применяемые в акустике

Звуковое давление p	Па		паскаль		
Интенсивность звука I	Вт/м^2				

Величина и ее обозначение	Действующие единицы			Соотношение с единицей СИ	Единицы, не допускаемые к применению; перевод в СИ
	СИ	Другие	Наименование		
Уровень звукового давления L_p	Нп		непер	1 Нп = 1 (безразмерна)	$L_p = \ln (p_1/p_2) = L_I =$ 0,5 ln (I_1/I_2) Нп
Уровень интенсивности звука L_I		дБ	децибел	1 Дб = ln10/20 = 0,1151 Нп	$L_p = 20 \lg (p_1/p_2) = L_I = 10 \lg (I_1/I_2)$ дБ
		Б	бел	1 Б = 10 дБ = 1,151 Нп	При f = 1000 Гц уровень громкости (физиологический) определяется в «фонах». 1 фон = 1 дБ, а громкость в «сонах» 1 сон = 40 фонов
Уровень звукового давления $L_{p\,1}$ Уровень звуковой мощности $L_{N\,1}$		дБ (А)			Ухо человека настроено на изменяемый в зависимости от частоты уровень громкости 20–40 фонов

12. Величины, применяемые в ядерной физике и других областях знаний

Энергия W		эВ	электрон-вольт	1эВ = 1,60219 10^{-19} Дж 1 МэВ = 10^6 эВ	
Активность нуклида в радиоактивном источнике A	Бк		беккерель	1 Бк = 1 $с^{-1}$	1 Ки (кюри) = 3,7 · 10^{10} Бк
Поглощенная доза излучения D	Гр		грэй	1 Гр = 1 Дж/кг	1 рад = 10^{-2} Гр
Эквивалентная доза излучения D_q	Зв		зиверт	1 Зв = 1 Дж/кг	1 бэр = 10^{-2} Зв
Мощность поглощенной дозы излучения D	Гр/с			1 Гр/с = 1 Вт/кг	1 рад/с = 10^{-2} Гр/с
Экспозиционная доза фотонного излучения (рентгеновского и гамма-излучений) J	Кл/кг				1 Р (рентген) = 258 10^{-6} Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения J	А/кг				
Количество вещества n	моль		моль		

Дополнительные единицы

Таблица 4. Перевод единиц

Единицы длины

Название	*Перевод*
микрон	1 мкм = 10^{-6} м
ангстрем	1 Å = 10^{-10} м
икс-единица	1 X ≈ 10^{-13} м
типографский пункт	1 пункт = 0,37607 мм
дюйм	1 дюйм = 25,4 мм
фут	1 фут = 12 дюймов = 0,3048 м
ярд	1 ярд = 3 фута = 0,9144 м
миля (сухопутная или статутная)	1 миля = 1760 ярдов = 1.6093 км
морская миля (международная)	1 миля = 1852 км (≈ 1′ дуги меридиана)
географическая миля	1 миля = 74204 км (≈ 4′ дуги экватора)
немецкая миля	1 миля = 7500 км

Дополнительные англо-американские единицы

микродюйм	1 микродюйм = 0,0254 мкм
миллидюйм	1 миллидюйм = 0,0254 мм
линк	1 линк = 201,17 мм
род	1 род = 1 полю = 1 перчу = 5,5 ярдам = 5,0292 м
фэсом	1 фэсом = 2 ярдам = 1,8288 м
чейн	1 чейн = 22 ярдам = 20,1168 м
фарлонг	1 фарлонг = 220 ярдам = 201,168 м

Единицы площади

Название	*Перевод*
квадратный дюйм	1 кв. дюйм = 6,4516 $см^2$
квадратный фут	1 кв. фут = 144 кв. дюйма = 0,0929 $м^2$
квадратный ярд	1 кв. ярд = 9 кв. футов = 0,8361 $м^2$
акр	1 акр = 4 840 кв. ярдов = 4046,9 $м^2$
квадратная миля	1 кв. миля = 640 акров = 2,59 $км^2$
морген	1 морген = 2500 $м^2$
барн	1 барн = 10^{-28} $м^2$

Единицы объема

Название	*Перевод*
кубический дюйм	1 куб. дюйм = 16,3871 $см^3$
кубический фут	1 куб. фут = 0,02832 $м^3$
кубический ярд	1 куб. ярд = 27 куб. футов = 0,76456 $м^3$

Дополнительные единицы объема, применяемые в Великобритании

унция	1 унция = 0,028413 л
пинта	1 пинта = 0,56826 л
кварта	1 кварта = 2 пинтам = 1,13652 л
галлон	1 галлон = 4 квартам = 4,5461 л
баррель	1 баррель = 36 галлонам = 163,6 л

Дополнительные единицы, применяемые в США

унция	1 унция = 0,029574 л
пинта	1 пинта = 0,47318 л
кварта	1 кварта = 2 пинтам = 0,94635 л
галлон	1 галлон = 4 квартам = 3,7854 л
баррель	1 баррель = 119,24 л
баррель нефти	1 баррель нефти = 42 галлонам = 158,99 л (сырая неочищенная нефть)

Единицы скорости

Название	*Перевод*
километр в час	1 км/ч = 1/3,6 м/с ≈ 0,2778 м/с
миля в час	1 миля/ч = 1,60934 км/ч
узел	1 узел = 1 морская миля/ч = 1,852 км/ч = 0,5144 м/с
число Маха	число Маха Ma показывает отношение скорости тела к скорости звука

Единицы массы

Единицы массы	*Единицы массы*
фунт (немецкий)	1 фунт = 0,5 кг

Название	*Перевод*
центнер (метрический)	1 центнер = 50 кг
доппельцентнер (метрический)	1 доппельцентнер = 100 кг
гамма	1 гамма = 10^{-6} г
метрический карат (только для драгоценных камней)	1 карат = 0,2 г
атомная единица массы	1 а.е.м. ≈ 1,6605 · 10^{-27} кг
гран	1 гран = 0,064799 г
пеннивейт	1 пеннивейт = 24 гранам = 1,5552 г
драхма	1 драхма = 1,77184 г
унция	1 унция = 16 драхм = 28,3495 г
тройская унция	1 тройская унция = 31,1035 г
фунт	1 фунт = 16 унций = 453,592 г
стоун (Великобр.)	1 стоун = 14 фунтам = 6,35 кг
квартер (Великобр.)	1 квартер = 28 фунтам = 12,7 кг
слаг (масса, которой придано ускорение в 1 фут/с² силой в 1 фунт-силу)	1 слаг = 14,5939 кг
хандредвейт (короткий, США)	1 хандредвейт = 1 квинталу = 100 фунтам = 45,3592 кг
хандредвейт (длинный, Великобр.)	1 хандредвейт = 112 фунтам = 50,8023 кг
тонна (короткая, США)	1 тонна = 907,185 кг
тонна (длинная, Великобр.)	1 тонна = 1016,05 кг

Единицы плотности

Название	*Перевод*
–	1 фунт/фут³ = 16,018 кг/м³
–	1 фунт/галлон (Великобр.) = 99,776 кг/м³
–	1 фунт/галлон (США) = 119,83 кг/м³

Градусы ареометра n или градусы Боме ($Bé$) — мера плотности ρ (в кг/л) жидкостей тяжелее (+ $Bé$) или легче (– $Bé$) воды при температуре 15 °С
$n = 144{,}3\ (\rho - 1)/\rho$, °$Bé$
В США для обозначения плотности различных видов топлив и нефти используется единица °API (Американский институт нефти)
$n = (141{,}5 - 131{,}5\ \rho)/\rho$, °API

Единицы силы

Название	*Перевод*
грамм-сила (понд)	1 гс = 9,80665 · 10^{-3} Н
килограмм-сила (килопонд)	1 кгс = 9,80665 Н
дина	1 дин = 10^{-5} Н
стен	1 стен = 1 кН
фунт-сила	1 фунт-сила = 4,44822 Н
паундаль (сила, которая телу массой 1 фунт придает ускорение 1 фут/с²)	1 паундаль = 0,138255 Н

Единицы давления

Название	*Перевод*
микробар	1 мкбар = 0,1 Па
милибар	1 мбар = 1 гПа = 100 Па
бар	1 бар = 10^5 Па
–	1 кгс/мм² = 9,80665 10^6 Па
техническая атмосфера	1 ат = 1 кгс/см² = 9,80665 · 10^4 Па
физическая атмосфера	1 атм = 1,01325 10^5 Па
торр	1 торр = 1 мм рт. ст. = 133,322 Па
–	1 мм вод. ст. = 1 кгс/м² = 9,80665 Па

Следующие единицы являются производными технической атмосферы:
p_{abs} (абсолютное давление) 1 ата
p_{amb} (внешнее давление)
$p_v = p_{abs} - p_{amb}$
(давление выше атмосферного)
$p_{abs} > p_{amb}$
$p_v = p_{amb} - p_{abs}$
(давление ниже атмосферного):
$p_{abs} < p_{amb}$

Дополнительные англо-американские и другие единицы давления

фунт-сила/кв. дюйм (psi)	1 фунт-сила/дюйм^2 = 6894,76 Па
фунт-сила/кв. фут	1 фунт-сила/фут^2 = 47,8803 Па
тонна-сила/кв. дюйм (Великобр.)	1 тонна-сила/дюйм^2 = $1{,}54443 \cdot 10^7$ Па
Паундаль/кв фут	1 паундаль/фут^2 = 1,48816 Па
бария (Франция)	1 бария = 0.1 Па
пьеза (Франция)	1 пьеза = 1 стен/м^2 = 1000 Па

Единицы энергии

Название	*Перевод*
эрг	1 эрг = 10^{-7} Дж
Калория [1]	1 кал = 4,1868 Дж
–	1 кгс м = 9,80665 Дж
–	1 л с ч = 2,6478 10^6 Дж
терм	1 терм = $105{,}50 \cdot 10^6$ Дж

Дополнительные англо-американские и другие единицы давления

дюйм · унция-сила	1 дюйм · унция-сила = 7,062 мДж
фут паундаль	1 фут · паундаль = 0,04214 Дж
дюйм фунт-сила	1 дюйм фунт-сила = 0,11299 Дж
фут фунт-сила	1 фут фунт-сила = 1,35582 Дж
БТЕ [2]	1 БТЕ = 1055,06 Дж
терм	1 терм = 10^5 БТЕ
британская [3] л с ч	1 британская л с ч = 2.685 10^6 Дж
терми (Франция)	1 терми = 1 000 фринори (Франция) = 1 000 ккал = 41,868 МДж
килограмм эквивалента угля	1 кг эквивалента угля = 29,3076 МДж (при удельной теплопроизводительности угля H_u = 7000 ккал/кг)
тонна эквивалента угля	1 т эквивалента угля = 1 000 кг эквивалента угля

Единицы мощности

Название	*Перевод*
килокалория/час	1 ккал/ч = 1,163 Вт
калория/с	1 кал/с = 4,1868 Вт
–	1 кгс м/с = 9,80665 Вт
лошадиная сила	1 л.с. = 735,499 Вт
понселе (Франция)	1 понселе = 100 кгс · м/с = 980,665 Вт

Дополнительные англо-американские и другие единицы давления

–	1 фут · фунт-сила/с = 1,35582 Вт
британская лошадиная сила [3]	1 британская л с = 745,70 Вт
–	1 БТЕ/с = 1055,06 Вт

Расход топлива

Название	*Перевод*
–	1 г/(л с ч) = 1,3596 г/(кВт ч)
–	1 фунт/(британская л.с. · ч) = 608,277 г/(кВт ч)
–	1 жидкая пинта/(британская л.с. · ч) = 634,545 см^3/(кВт ч)

x миль/галлон (США) = $235{,}21/x$ л/100 км

x миль/галлон (Великобрит) = $282{,}48/x$ л/100 км

y л/100 км = $235{,}21/y$ миль/галлон (США)

[1] Калория — количество теплоты, необходимое для того, чтобы поднять температуру 1 г воды с 15 до 16 °С

[2] БТЕ (британская тепловая единица) — количество теплоты, необходимое для того, чтобы поднять температуру 1 фунта воды с 63 до 64 °F

[3] Британская л с = 1,0139 л с

y л/100 км = 282,48/y миль/галлон (Великобрит.)

Единицы температуры

Название	*Перевод*
K (кельвин)	
°C (градус Цельсия)	Θ/°C = T/K – 273,15 Эта шкала базируется на температуре замерзания воды при 0 °C и температуре кипения при 100 °C, при нормальном давлении в каждом случае
°F (градус Фаренгейта)	T_F/°F = 1,8 · T/K – 459,67 Температура замерзания воды равна 32 °F, температура тела человека равна 96 °F
°Ra (градус Ренкина)	T_{Ra}/°Ra = 1,8 T/K Эта шкала начинается с точки абсолютной температуры 0 K и использует градуировку как в шкале Фаренгейта
°Re (градус Реомюра)	T_{Re}/°Re = 0,8 · (T/K – 273,15) Температура замерзания воды равна 0 °Re, температура кипения равна 80 °Re
Соотношение температур	1 K = 1 °C = 1,8 °F = 1,8 °Ra = 0,8 °Re

Единицы кинематической вязкости

Название	*Перевод*
	1 фут²/с = 0,092903 м²/с Измерение проводится на вискозиметре в соответствии со стандартом ISO 2431
A-секунды	Время вытекания жидкости из масленки (DIN 53 211)
число Энглера	Относительное время вытекания жидкости из аппарата Энглера (DIN 51 560)· 1 °E ≙ 7,6 мм²/с
RI-секунды	Время вытекания жидкости из вискозиметра Redwood-I (Великобрит.)· 1 R'' ≙ 4,06 мм²/с
SU-секунды	Время вытекания жидкости из вискозиметра Saybolt Universal (США)· 1 S'' ≙ 4,63 мм²/с

Физические константы

Источник: [2]
Числа в скобках обозначают погрешность двух последних цифр

Таблица 5. Физические константы

Число Авогадро N_A	6,022 141 5(10) 10^{23} моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана k	1,380 650 5(24) · 10^{-23} Дж/K
Элементарный электрический заряд e	1,602 176 53(14) · 10^{-19} Кл
Электрическая постоянная ε_0	$1/(\mu_0 \cdot c^2)$ ≙ 8.854 187 817 62 10^{-12} Ф/м
Магнитная постоянная p_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м ≙ 12,566 370 614 · 10^{-7} Гн/м
Гравитационная постоянная G	6,674 2(10) 10^{-} м^{2}/(кг с2)
Скорость света c (в вакууме)	2,997 924 58 10^{8} м/с
Атомная единица массы	1,660 538 86(28) 10^{-27} кг
Постоянная Планка (элементарный квант действия) h	6,626 069 3(11) · 10^{-34} Дж · с
Масса электрона m_e	9,109 382 6(16) 10^{-31} кг
Масса протона m_p	1,672 621 71(29) · 10^{-27} кг
Постоянная Стефана-Больцмана σ	5,670 400 (40) 10^{-8} Вт/(м² K⁴)
Универсальная газовая постоянная R	8,314 472 (15) Дж/(моль · K)

Список литературы

[1] 8th Edition of the SI Brochure, printed in the PTB Reports, 117th year, Volume 2, June 2007, Braunschweig and Berlin.
[2] PTB leaflet "The legal units in Germany" (2004), Braunschweig.

Основные уравнения, применяемые в механике

Прямолинейное и вращательное движение

Равномерным движением называют такое, при котором скорость v или частота вращения n постоянны. В этом случае ускорение (a или α) равно нулю.

При постоянном ускорении движение является равноускоренным. В случае отрицательного постоянного ускорения, движение является равнозамедленным (см. табл. 1 и 2).

Передача силы

Действие механизмов для передачи силы может быть сведено к использованию принципов рычага и клина.

Принцип рычага

Система находится в равновесии, если сумма моментов равна нулю. Без учета трения применяются следующие правила (рис. 1):

$M_{r1} = M_{r2}$ или $F_1 r_1 = F_2 r_2$.

Таблица 1. Прямолинейное и вращательное движение

Прямолинейное движение (перемещение)		Вращательное движение (вращение)	
Масса $m = Vp$		Момент инерции (табл. 3) $J = mi^2$	
Расстояние $s = \int v(t)\,dt$		Угол $\varphi = \int \omega(t)\,dt$	
$s = vt$	[v = const.]	$\varphi = \omega t = 2\pi n$	[n = const.]
$s = {}^1/_2 at^2$	[a = const.]	$\varphi = {}^1/_2 \alpha t^2$	[α = const.]
Скорость $v = ds(t)/dt$		Угловая скорость $\omega = d\varphi(t)/dt$	
$v = s/t$	[v = const.]	$\omega = \varphi/t = 2\pi n$	[n = const.]
$v = at = \sqrt{2as}$	[a = const.]	$\omega = \alpha t = \sqrt{2\alpha\varphi}$	[α = const.]
		линейная скорость произвольной точки вращающегося тела $v = r\omega$	
Ускорение $a = dv(t)/dt$		Угловое ускорение $\alpha = d\omega(t)/dt$	
$a = (v_2 - v_1)/t$	[a = const.]	$\alpha = (\omega_2 - \omega_1)/t$	[α = const.]
		Центробежное ускорение $a_r = r\omega^2$	
Сила $F = ma$		Крутящий момент $M_t = Fr = J\alpha$ Центробежная сила $F_r = mr\omega^2$	
Работа $W = Fs$		Работа $W = M_t\varphi$	
Энергия перемещения $E_k = {}^1/_2 mv^2$ Потенциальная энергия $E_p = F_G h$		Энергия вращения $E_{rot} = {}^1/_2 J\omega^2$	
Мощность $P = Fv$		Мощность $P = M_t\omega = M_t \cdot 2\pi n$	
Импульс силы $I = F_m(t_2 - t_1)$		Импульс момента силы $H = M_{t\,m}(t_2 - t_1)$	
Момент импульса $p = mv$		Угловой момент импульса $L = J\omega = J \cdot 2\pi n$	

Таблица 2. Величины и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
A	Площадь	$м^2$
E_k	Кинетическая энергия	Дж = Н·м
E_p	Потенциальная энергия	Дж = Н·м
E_{rot}	Энергия вращения	Дж = Н·м
F	Сила	Н
F_G	Вес тела	Н
F_m	Среднее значение силы, действующей на тело за период импульса	Н
F_z	Центробежная сила	Н
H	Импульс момента силы	Н·м·с = кг·$м^2$/с
I	Импульс силы	Н·с = кг·м/с
J	Момент инерции	кг·$м^2$
L	Угловой момент импульса	Н·м·с
M_t	Крутящий момент	Н·м
$M_{t\,m}$	Среднее значение крутящего момента, действующего на тело за период импульса	Н·м
P	Мощность	Вт = Н·м/с
V	Объем	$м^3$
W	Работа, энергия	Дж = Н·м
a	Ускорение	м/$с^2$
a_z	Центробежное ускорение	м/$с^2$
d	Диаметр	м
e	Основание натурального логарифма (e = 2,781)	–
g	Ускорение свободного падения (g = 9,81)	м/$с^2$
h	Высота	м
ι	Радиус вращения	м
l	Длина	м
m	Масса	кг
n	Частота вращения	1/с
p	Момент импульса	Н·с
r	Радиус	м
s	Длина траектории	м
t	Время	с
v	Скорость	м/с
α	Угловое ускорение	рад/$с^2$
α	Угол клина	рад
β	Угол охвата	рад
μ	Коэффициент трения	–
ρ	Плотность	кг/$м^3$
φ	Угол поворота	рад
ω	Угловая скорость	1/с

Принцип рычага встречается во многих механизмах, начиная от простых плоскогубцев, гаечных ключей и отверток, и кончая зубчатыми и ременными передачами, вплоть до кривошипно-шатунного механизма в поршневых двигателях.

Силы, действующие в клиновом соединении

В зависимости от угла клина α, действие небольшого усилия F на клин приводит к созданию больших нормальных сил F_N (рис. 2). Без учета трения это описывается уравнением:

$$F_N = \frac{F}{2\sin\frac{\alpha}{2}}$$

С помощью клинового соединения на ограниченном пространстве могут прикладываться очень большие силы. Примерами могут служить клинья, используемые для передачи крутящего момента в соединениях вал-ступица и конических соединениях. Также по классическому принципу клина работают винтовое соединение и эксцентриковый зажим.

Рис. 1. Принцип рычага:
F - сила; r - радиус



Рис. 2. Усилия на клине:
F - сила, F_N - нормальная сила, α - угол клина

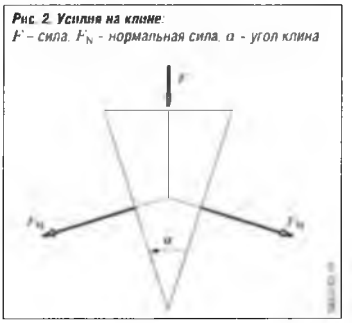
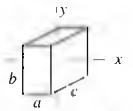
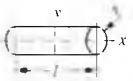
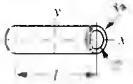
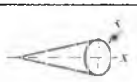
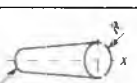
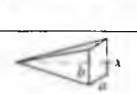
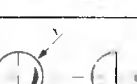


Таблица 3. Моменты инерции

Вид тела	Моменты инерции (J_x по оси x [1], J_y по оси y [1])	
Прямоугольный параллелепипед		$J_x = m\frac{b^2+c^2}{12}$ $J_y = m\frac{a^2+c^2}{12}$ $J_x = J_y = m\frac{a^2}{6}$ (куб со стороной a)
Цилиндр		$J_x = m\frac{r^2}{2}$ $J_y = m\frac{r^2+l^2}{12}$
Полый цилиндр		$J_x = m\frac{r_в^2+r_н^2}{2}$ $J_y = m\frac{r_в^2+r_н^2+l^2/3}{4}$
конус		$J_x = m\frac{3r^2}{10}$ $J_x = m\frac{r^2}{2}$ Поверхность конуса (исключая основание)
Усеченный конус		$J_x = m\frac{3(R^5-r^5)}{10(R^3-r^3)}$ $J_x = m\frac{(R^2+r^2)}{2}$ Поверхность конуса (исключая торцевые поверхности)
Пирамида		$J_x = m\frac{a^2+b^2}{20}$
Шар и полушарие		$J_x = m\frac{2r^2}{5}$ $J_x = m\frac{2r^2}{3}$ Площадь сферы
Полый шар $r_н$ – радиус внешней сферы $r_в$ – радиус внутренней сферы		$J_x = m\frac{2(r_н^5-r_в^5)}{5(r_н^3-r_в^3)}$
Тор		$J_x = m\left(R^2+\frac{3}{4}r^2\right)$

[1] Момент инерции для оси, параллельной оси x или оси y и отстоящей от оси x или оси y на расстоянии a $J_д = J_x + ma^2$ или $J_д = J_y + ma^2$.

Трение

При движении прилегающих тел относительно друг друга, образуется трение, вызывающее механическое сопротивление, которое действует в направлении, противоположном направлению движения v (Рис. 3). Сила сопротивления, известная как сила трения F_R, пропорциональна нормальной силе F_N. Статическое трение существует до тех пор, пока внешняя сила меньше силы трения, а тело остается в покое. При преодолении статического трения тело приходит в движение, и сила трения скольжения подчиняется закону Кулона:

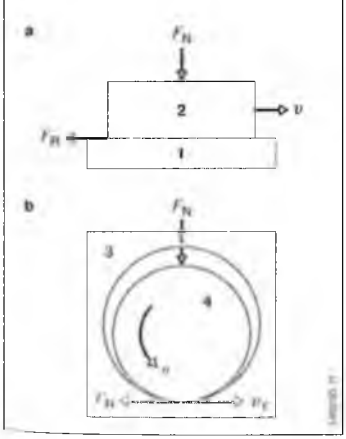
$$F_R = \mu F_N .$$

Трение в клиновом соединении

С учетом трения, прилагаемая к клину сила (рис. 4) определяется по формуле:

$$F = 2\left(F_N \sin\frac{\alpha}{2} + F_R \cos\frac{\alpha}{2}\right).$$

Рис. 3. Трение:
a – прямолинейное движение;
b – вращательное движение;
1 – основание, 2 – тело скольжения;
3 – корпус подшипника; 4 – вал;
F_N – нормальная сила; F_R – сила трения;
v – скорость;
v_T – тангенциальная скорость в точке касания



Нормальная сила F_N равна:

$$F_N = \frac{F}{2\left(\sin\frac{\alpha}{2} + \mu\cos\frac{\alpha}{2}\right)}.$$

Трение каната в блоке

При относительном движении каната по шкиву возникает трение скольжения (рис. 5, например, ленточный тормоз, блок). Если канат и шкив относительно друг друга находятся в неподвижном состоянии, имеет место трение покоя (например, ременной привод, ленточный тормоз, блок в состоянии покоя). Соответственно, следует применять коэффициент трения скольжения μ или коэффициент статического трения μ_H.

Рис. 4. Трение в клиновом соединении:
F_N – нормальная сила;
F_R – сила трения,
α – угол клина

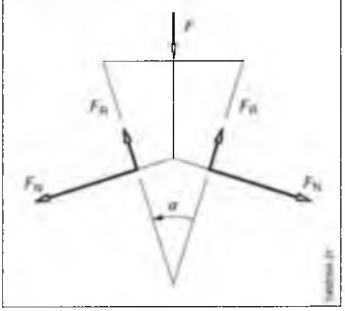
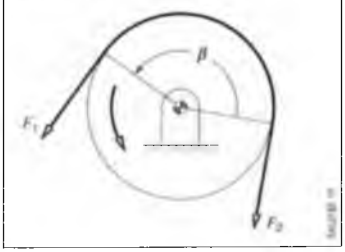


Рис. 5. Трение каната в блоке:
F_1 – сила 1,
F_2 – сила 2,
β – угол охвата



В соответствии с формулой Эйлера, соотношение сил в блоке равно:

$$F_2 = F_1 e^{\mu\beta}.$$

Сила трения равна:

$$F_R = F_2 - F_1,$$

а момент трения определяется по форуле:

$$M_R = F_R r.$$

Коэффициент трения

Коэффициент трения всегда характеризует свойства системы, а не только свойства материала. Значения коэффициента трения, среди других параметров системы, зависят от характеристик взаимодействующих между собой материалов (см. табл. 4), температуры, состояния контактируемых поверхностей, скорости скольжения, факторов окружающей среды (например, воды или углекислого газа, которые могут адсорбироваться на поверхности) и присутствия промежуточного материала (смазки). По этой причине коэффициент трения всегда колеблется в определенных пределах, и точное его установление возможно только экспериментальным путем.

Коэффициент статического трения, как правило, больше коэффициента трения скольжения. В особых случаях, трение коэффициент может быть больше единицы (например, при очень гладких поверхностях, когда силы сцепления становятся преобладающими, или при использовании гоночных шин, наделенных эффектом адгезии).

Список литературы

[1] Boge, A.: Technische Mechanik. Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
[2] Hibbeler, R.: Technische Mechanik 1st, 2nd and 3rd Pearson Studies, 2005, 2006.
[3] Dubbel: Taschenbuch fur den Maschinenbau, 22nd Edition. Springer-Verlag 2007.

Таблица 4. Эталонные значения коэффициентов статического трения и трения скольжения *(согласно [3])*

Материалы	Коэффициент статического трения μ_0		Коэффициент трения скольжения μ	
	сухие	смазанные	сухие	смазанные
Железо о железо	0,45–0,80	0,10	1,0	0,10
Медь о медь			0,60 – 1,0	
Сталь о сталь			0,40 – 0,70	
Хром о хром			0,41	
Никель о никель			0,39 – 0,70	
Алюминиевый сплав об алюминиевый сплав			0,15 – 0,60	
Сталь о медь			0,23 – 0,29	
Сталь о баббит			0,21	
Сталь о серый чугун	0,18 – 0,24	0,10	0,17 – 0,24	0,02 – 0,21
Тормозная накладка о сталь	0,60	0,20	0,50 – 0,60	0,20 – 0,50
Кожа о металл			0,20 – 0,25	0,12
Полиамид о сталь			0,32 – 0,45	0,10
Политетрафторэтилен о сталь			0,04 – 0,22	—
Лед о сталь	0,027	—	0,014	—

Колебания и вибрации

Определения

(Обозначения и единицы измерения в Табл. 1, см. также DIN 1311, [1], [2] и [3]).

Колебания или вибрации
Термины, применяемые для обозначения изменений какой-либо физической величины, более или менее регулярно повторяющихся во времени и меняющихся по направлению (рис. 1).

Период
Время T, за которое совершается одно полное колебание.

Амплитуда
Максимальное мгновенное (пиковое) значение y, которого достигает какая-то физическая величина, совершающая синусоидальное колебание.

Частота
Число f колебаний, совершаемых в секунду. Это величина, обратная периоду колебаний T.

Угловая частота
Угловая частота ω – это частота f, умноженная на 2π.

Колебательная скорость частицы
Мгновенное значение переменной скорости частицы v, движущейся в направлении колебания. Не следует путать со скоростью распространения бегущей волны (например, скоростью звука).

Рис. 1. Синусоидальное колебание

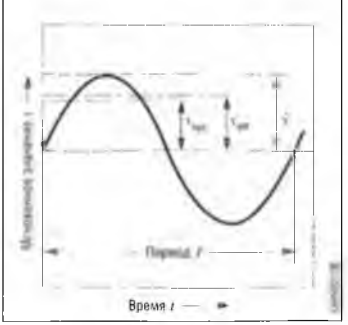


Таблица 1. Условные обозначения величин и единицы измерения

Величина		единица измерения
a	Коэффициент сохранения	
b	Коэффициент демпфирования	
C	Коэффициент сохранения	
C	Подрессоренность	Н/м
c_α	Жесткость при кручении	Н м/рад
C	Ёмкость	F
f	Частота	Гц
f_g	Резонансная частота	Гц
Δf	Ширина резонансного пика половинной энергии	Гц
F	Сила	Н
F_Q	Функция возбуждения	
I	Сила тока	А
J	Момент инерции	кг м^2
l	Индуктивность	Н
M	Масса	кг
M	Момент силы (крутящий момент)	Н·м
n	Частота вращения	1/мин
Q	Заряд	С
Q	Острота резонанса	
r	Коэффициент демпфирования	Н с/м
r_α	Угловой коэффициент затухания	Н·с м
R	Активное сопротивление	Ω
T	Время	с
T	Период	с
U	Напряжение	В
v	Колебательная скорость частицы	м/с
x	Перемещение	м
y	Мгновенное значение	
$\hat{y}$	Амплитуда	
y ($\ddot{y}$)	Одиночная (двойная) производная от времени	
y_{rec}	Значение выпрямления	
y_{eff}	Эффективное значение	
α	Угол	рад
δ	Коэффициент затухания	1/с
Λ	Логарифмический декремент	
ω	Угловая скорость вращения	рад/с
ω	Угловая частота	1/с
Ω	Частота цепи возбуждения	1/с
D	Декремент	
D_{opt}	Декремент оптимального затухания	
	Обозначения подстрочных индексов:	
0	Незатухающие	
d	Затухающие	
T	Амортизатор	
U	Базовая опора	
G	Машина	

Ряды Фурье
Любую периодическую функцию, являющуюся гладкой и кусочно-непрерывной, можно представить как совокупность синусоидальных гармонических компонентов.

Биения
Биения происходят при наложении двух синусоидальных колебаний со схожей частотой ($f_1 \approx f_2$). Они являются периодическими. Основная частота в этом случае равна разнице между частотами наложенных синусоидальных колебаний.

Собственная частота
Собственная частота – это такая частота f, при которой колебательная система колеблется свободно после однократного возбуждения (собственные колебания). Она зависит только от характеристик самой колебательной системы.

Демпфирование
Мера потерь энергии в колебательной системе при превращении одной формы энергии в другую. Следствием является затухание колебаний (рис. 2).

Декремент
Декремент D – это мера измерения степени демпфирования.

Логарифмический декремент
Логарифмический декремент Λ – это натуральный логарифм отношения двух экстремальных значений собственных затухающих колебаний, различающихся на один период.

Вынужденные колебания
Возникают под влиянием внешней физической силы (возбуждения). Частота вынужденных колебаний определяется частотой возбуждения.

Передаточная функция
Передаточная функция – это частное амплитуды наблюдаемого состояния или выходной переменной и амплитуды возбуждения, находящееся в зависимости от частоты возбуждения f или частоты цепи возбуждения ω.

Резонанс
Возникает, когда передаточная функция принимает очень большие значения, при этом частота возбудителя приближается к собственной частоте.

Резонансная частота
Частота резонатора, при которой колеблющаяся величина достигает своего максимального значения. Если пренебречь демпфированием, резонансная частота равна собственной частоте.

Ширина резонансного пика половинной энергии
Разница между частотами, при которой уровень переменной величины падает до $1/\sqrt{2} \approx 0{,}707$ максимального значения.

Острота резонанса
Острота резонанса Q (или добротность) – это максимальное значение передаточной функции.

Соединение колебательных систем
Если две колебательные системы соединяются механически, посредством массы или упругости, либо электрически, посредством индуктивности или емкости, между ними происходит периодический обмен энергией.

Волна
Волна – это пространственное и временное изменение состояния среды, которое можно представить как однонаправленное ее перемещение. Если материя может существовать в пространстве, не обязательно, что она может быть перемещена.

Существуют поперечные и продольные волны.

Интерференция
Принцип независимого наложения волн. В любой точке пространства мгновенное значение результирующей волны равно сумме мгновенных значений каждой из волн.

Плоская волна
Плоская волна – это волна, у которой поверхности одинаковой фазы (например, максимумы или фронты волны) формируют плоскость, т.е. которая распространяется по линейному закону. Фронты волны расположены вертикально по отношению к направлению распространения.

Стоячие волны
Стоячие волны возникают в результате интерференции между двумя волнами, движущимися в противоположных направлениях, с равными длиной, частотой и амплитудой. Амплитуда стоячей волны постоянна в любой точке; узлы колебаний (нулевая амплитуда) и пучности (максимальная амплитуда) совпадают. Стоячие волны наблюдаются, например, когда плоская волна отражается от плоской поверхности, расположенной вертикально по отношению к направлению распространения волны.

Значение выпрямления
Значение выпрямления y_{rec} – это среднее арифметическое значение, линейное во времени, параметров периодического сигнала:

$$y_{rec} = \frac{1}{T}\int_0^T |y|\, dt.$$

Для синусоидальной кривой:

$$y_{rec} = \frac{2\hat{y}}{\pi} = 0{,}637\,\hat{y}.$$

Эффективное значение
Эффективное значение y_{eff} это временное виртуальное значение периодического сигнала. Оно также известно как среднеквадратическое значение:

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T y^2\, dt}\ .$$

Для синусоидальной кривой:

$$y_{eff} = \frac{\hat{y}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\,\hat{y}.$$

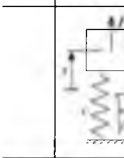
Коэффициент гармоник
Коэффициент гармоник – это соотношение y_{eff} и y_{rec}. Для синусоидальной кривой коэффициент гармоник равен $y_{eff}/y_{rec} \approx 1{,}111$.

Амплитудный фактор
Для синусоидальной кривой амплитудный фактор равен: $\hat{y}/y_{eff} = \sqrt{2} \approx 1{,}414$.

Уравнения

Данные уравнения применимы к следующим простым колебаниям (таблица 2), если общие обозначения в формулах заменить соответствующими обозначениями физических величин.

Таблица 2. Простые колебательные системы

	Механическая		Электрическая
	Поступательная	Вращательная	
			
Символ	Физическая величина		
y	x	α	Q
$\dot{y}$	$\dot{x} = v$	$\dot{\alpha} = \omega$	$\dot{Q} = I$
$\ddot{y}$	$\ddot{x} = \dot{v}$	$\ddot{\alpha} = \dot{\omega}$	$\ddot{Q} = \dot{I}$
F_0	F	M	U
a	M	J	L
b	r	r_a	r
C	C	C_a	$1/C$

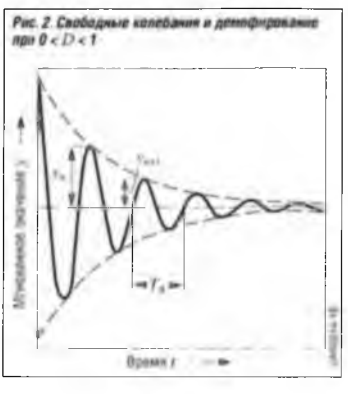
Дифференциальное уравнение

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_0(t) = \hat{F}_0 \sin \Omega t,$$

Период $T = 1/f$,
Угловая частота $\omega = 2\pi f$.

Синусоидальное колебание: $y = \hat{y} \sin \omega t$.

Рис. 2. Свободные колебания и демпфирование при $0 < D < 1$



Собственные колебания ($F_Q = 0$)
Логарифмический декремент (рис. 2):

$$\Lambda = \ln\left(\frac{y_i}{y_{i+1}}\right) = \frac{\pi b}{\sqrt{ca - \frac{b^2}{4}}},$$

Коэффициент затухания $\delta = \frac{b}{2a}$,

Декремент $D = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{b}{2\sqrt{ca}}$,

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{\Lambda^2 + 4\pi^2}} \approx \frac{\Lambda}{2\pi}$$ (низкая степень демпфирования).

Угловая частота незатухающих колебаний ($D = 0$): $\omega_0 = \sqrt{c/a}$.

Угловая частота затухающих колебаний ($0 < D < 1$): $\omega_d = \omega_0\sqrt{1-D^2}$.

При $D \geq 1$ колебания отсутствуют, только медленное перемещение.

Вынужденные колебания
Величина функции передачи:

$$\frac{\bar{y}}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(c - a\Omega^2)^2 + (b\,\Omega)^2}}$$

$$= \frac{1}{c\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2D\Omega}{\omega_0}\right]^2}}$$

Резонансная частота $f_g = f_0\sqrt{1-2D^2} < f_0$,

Острота резонанса $Q = 1/\left(2D\sqrt{1-D^2}\right)$,

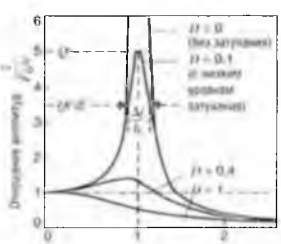
Резонансная частота $f_g \approx f_0$ (при $D \leq 0{,}1$),

Острота резонанса

$Q \approx \frac{1}{(2D)}$ (при $D \leq 0{,}1$),

Ширина резонансного пика половинной энергии $\Delta f = 2Df_0 = \frac{f_0}{Q}$.

Рис. 3. Стандартизированная передаточная функция



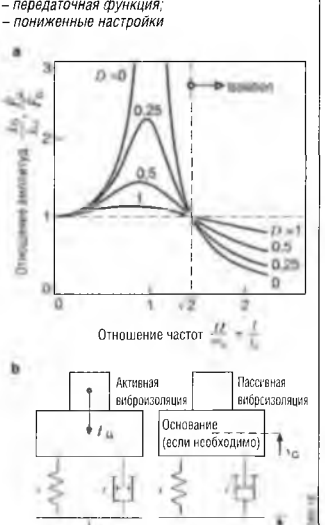
Ослабление вибрации

Гашение вибраций
Если демпфирование вибраций может быть выполнено между машиной и местом, в наименьшей степени подверженным их воздействию, то это обеспечит наибольший уровень затухания (при наибольшем декременте, см.рис. 3.

Виброизоляция
Активная виброизоляция
Машина должна устанавливаться на опору таким образом, чтобы силы, передающиеся на нее, были незначительными.

Необходимо выбирать опору так, чтобы конструкция находилась вне резонанса, и ее собственная частота была бы ниже самой низкой возмущающей частоты. Затухание ухудшает виброизоляцию. Слишком низкие значения затухания могут привести к трудностям, вызванным резонансом во время разгона машины (рис. 4).

Рис. 4. Виброизоляция:
a – передаточная функция;
b – пониженные настройки



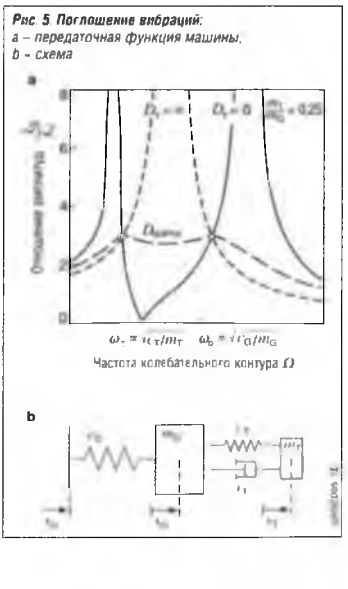
Пассивная виброизоляция
Машина должна монтироваться таким образом, чтобы вибрация и тряска на опорах передавались механизмам в незначительной степени.

Принимаемые меры аналогичны случаю с активной изоляцией. Во многих случаях, гибкая подвеска или усиленное демпфирование неприменимы. Для предотвращения возникновения резонанса, крепление машины должно быть таким жестким, чтобы собственная частота была намного больше самой высокой частоты возбуждения, которая может возникнуть (рис. 4).

Поглощение вибраций
Гаситель колебаний с фиксированной собственной частотой
При настройке собственной частоты f_T поглощающей массы с гибким соединением без потерь на частоту возбуждения, вибрация основной массы полностью поглощается (рис. 5) и продолжает вибрировать только поглощающая масса. Эффективность поглощения снижается по мере того, как изменяется частота возбудителя. Затухание препятствует полному поглощению. Однако соответствующая настройка частоты гасителя колебаний и декремента оптимального затухания вызывает широкополосное ослабление вибрации, которое остается эффективным при изменении частоты возбудителя.

Гаситель колебаний с переменной собственной частотой
Вращательные колебания с частотами возбуждения, пропорциональными частоте вращения (например, порядок уравновешивания ДВС), могут поглощаться с помощью амортизаторов с собственными частотами, пропорциональными частоте вращения (маятник в поле центробежных сил). Поглощение вибраций эффективно при любых скоростях вращения. Поглощение вибраций возможно и для колебательных систем (осцилляторов) с несколькими степенями свободы, посредством использования нескольких гасителей колебаний.

Рис. 5. Поглощение вибраций:
a – передаточная функция машины,
b – схема



Модальный анализ

Динамические характеристики (характеристики собственных колебаний) колебательных систем определяются с помощью модального анализа. Он используется в проектировании, помимо прочих способов, для оптимизации конструкций с точки зрения колебательных параметров и идентификации проблемных участков, а также в акустике для анализа шумов, порождаемых конструкцией изделия ([4]).

Колебательная конструкция, которая, представляя собой сплошную среду, имеет бесконечно много степеней свободы, заменяется в явном виде конечным числом одномассовых генераторов колебаний. Созданная таким образом модальная модель конструкции описывается модальными параметрами:
- формы собственных колебаний (собственный вектор или мода);
- собственные частоты (собственные значения);
- и соответствующие модальные параметры демпфирования.

Необходимым условием является не изменяющаяся во времени линейно-эластичная структура. Любое колебание структуры может быть искусственно воссоздано по известным характеристическим векторам и значениям. Тем не менее, колебания наблюдаются лишь в ограниченном числе точек из возможных направлений колебаний (степеней свободы) и в определенных частотных интервалах.

Еще более детальный процесс совмещения субструктур объединяет, например, модальные модели различных структур в одну общую модель.

Числовой модальный анализ

Для выполнения аналитического модального анализа необходимо знать геометрию модели, свойства материала и граничные условия. Основой числового модального анализа является многочастичная система или конечноэлементная модель конструкции. Из этого вычисляются собственные значения и собственные векторы решением задачи на собственные значения.

Числовой модальный анализ выполняется без прототипа конструкции и может использоваться уже на ранних стадиях разработки. Однако часто точных знаний о фундаментальных свойствах конструкции (демпфирование, граничные условия) не хватает, и это означает, что модальная модель иногда бывает ошибочной. Кроме того, ошибка является неидентифицируемой. Одним из решений данной проблемы служит корректировка модели с использованием результатов экспериментального модального анализа.

Экспериментальный модальный анализ

Для экспериментального модального анализа необходим прототип конструкции. Анализ основывается на измерениях передаточных функций. С этой целью конструкция либо возбуждается в одной точке в заданном диапазоне частот, и колебательные отклики измеряются в нескольких точках, либо она возбуждается последовательно в нескольких точках, и колебательные отклики всегда измеряются в одной точке. Модальная модель выводится из матрицы функций передачи, которые определяют данную модель. В качестве средства возбуждения используется импульсный молот или электродинамический «вибратор». Отклик измеряется с помощью датчиков ускорения или лазерного виброметра.

Экспериментальный модальный анализ также может применяться для подтверждения результатов числового анализа. Затем могут быть выполнены имитационные расчеты на достоверной числовой модели. В расчетах вычисляется ответная реакция структуры на определенное возбуждение, соответствующее, например, условиям лабораторного опыта.

Посредством структурных модификаций (изменения массы, затухания или жесткости) динамическое поведение может быть оптимизировано до уровня, соответствующего действующим условиям. При сравнении модальных моделей, полученных при помощи обоих способов, окажется, что аналитический модальный анализ более точен, чем экспериментальный, за счет большего числа степеней свободы. Это, в частности, позволяет проводить расчеты, основанные на модели.

Формы собственных колебаний по результатам модального анализа могут быть отражены в графическом или анимационном виде (примеры на рис. 6). Различные уровни серого показывают перемещение вертикально по плоскости проекции. Частичное искривление дисков является результатом данных перемещений.

Справочная литература

[1] DIN 1311: (Механические) вибрации, колебательные и вибрационные системы – Часть 1: Основные понятия, обзор.
[2] P. Hagedorn: Technische Schwingungslehre I, Springer-Verlag, 1987.
[3] P. Hagedorn: Technische Schwingungslehre II, Springer-Verlag, 1998.
[4] G. Natke: Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse, Viewег-Verlag, 1992.

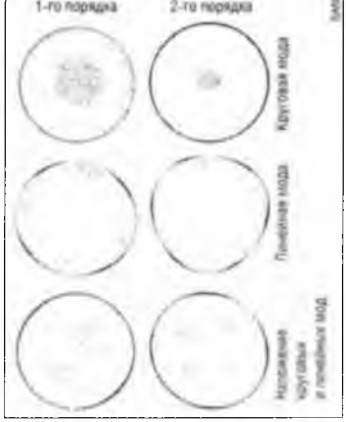


Рис. 6. Формы собственных колебаний круглых дисков

Акустика

Общие понятия

(см. табл. 1 и DIN 1320 [1])

Звук
Механические колебания и волны, распространяющиеся в упругой среде, в слышимых областях частот (16 – 20 000 Гц).

Ультразвук
Механические колебания, находящиеся выше области частот, слышимых человеческим ухом.

Звуковое давление
Звуковое давление p — периодически изменяющееся давление, возникающее при прохождении в среде звуковой волны. В свободном звуковом поле:

$$p = v\,Z.$$

Обычно измеряется эффективное значение звукового давления.

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения *(см. также DIN 1332 [2])*

Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
c	Скорость звука	м/с
f	Частота	Гц
I	Интенсивность звука	Вт/м^2
L_I	Уровень интенсивности звука	дБ
L_{Aeq}	Эквивалентный уровень звука, А-скорректированный	дБ (А)
L_{pA}	Уровень звукового давления, А-скорректированный	дБ (А)
L_t	Уровень оценки звука	дБ (А)
L_{WA}	Уровень звуковой мощности, А-скорректированный	дБ (А)
P	Звуковая мощность	Вт
p	Звуковое давление	Па
S	Площадь	м^2
T	Время реверберации	с
v	Колебательная скорость (скорость частиц)	м/с
Z	Удельное акустическое сопротивление	Па с/м
a	Коэффициент звукопоглощения	
λ	Длина	м
ρ	Плотность	кг/м^3
ω	Круговая частота (= 2 πf)	1/с
L_{den}	Индекс воздействия шума «день-вечер-ночь»	дБ (А)
SEL	Уровень звуковой экспозиции	дБ (А)

Динамика порогов слышимости
Способность человеческого уха воспринимать звуки от слухового до болевого порога. Это соответствует диапазону звуковых давлений до 1 : 10 000 000.

Децибел (дБ)
Децибел — безразмерная единица, предназначенная для выражения в логарифмическом масштабе отношения измеряемой величины к исходной величине. Например, в акустике в дБ часто приводится уровень звукового давления:

$$L_p = 20 \log_{10}\left(\frac{p}{p_{ref}}\right).$$

Децибелы используются при измерении величин, меняющихся в широком диапазоне.

Частота
Частота f равна числу колебаний в секунду. За единицу измерения частоты принят герц (Гц): 1 Гц = 1/с.

Длина волны
Длиной волны называется расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковых фазах. Длина волны выражается через частоту по формуле:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega}$$

Колебательная скорость
Колебательная скорость v — это скорость колебательного движения частиц среды. В свободном звуковом поле:

$$v = \frac{p}{Z}.$$

Восприятие колебаний при низких частотах примерно пропорционально колебательной скорости.

Распространение звука
В общем случае, звуковые волны распространяются от точечного источника звука сферическим фронтом. В свободном звуковом поле звуковое давление уменьшается с удалением от источника звука на 6 Дб при каждом удвоении расстояния.

Скорость звука
Скорость звука c — скорость распространения звуковой волны в среде (табл. 2).

Удельное акустическое сопротивление
Удельное акустическое сопротивление Z определяет передающие свойства среды применительно к звуковым волнам:

$$Z=\frac{p}{v}=\rho c \quad (\text{в Н·с/м}^3).$$

Звуковая мощность
Звуковая мощность P — мощность, исходящая от источника звука в единицу времени. Звуковая мощность не зависит от акустических свойств помещения, в котором находится источник звука, и расположения источника звука.

Интенсивность звука
Интенсивность звука I — отношение звуковой мощности, падающей на поверхность, к площади этой поверхности:

$$I=\frac{P}{S}.$$

В свободном звуковом поле:

$$I=\frac{p^2}{\rho c}=v^2 \rho c.$$

Эффект Допплера
Для движущихся источников звука: если источник звука приближается к приемнику, воспринимаемая высота звука повышается; по мере увеличения расстояния, воспринимаемая высота звука понижается.

Звуковой спектр
Всякий шум представляет собой набор компонентов с разными частотами и уровнями звукового давления. Зависимость уровня звукового давления (воздушного или структурного шума) от частоты отображается в звуковом спектре, который устанавливается посредством частотного анализа.

Таблица 2. Скорость звука и длина волны в различных материалах

Материал/среда	Скорость звука c, м/с	Длина волны λ при 1000 Гц, м
Воздух, 20 °С, 1014 гПа	343	0,343
Вода, 10 °С	1440	1,44
Резина (в зависимости от твердости)	60–1500	0,06–1,50
Алюминий (брусок)	5100	5,1
Сталь (брусок)	5000	5,0

Октавный спектр
Уровень звукового давления определяется и отображается в полосах шириной с октаву. Октава (единица частотного интервала) определяется отношением 1:2. Средняя частота октавы равна:

$$f_m=\sqrt{f_1 f_2}.$$

Рекомендуемые средние частоты октав: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц.

Третьоктавный спектр
Уровень звукового давления определяется и отображается в полосах шириной в треть октавы. Треть октавы как единица частотного интервала определяется отношением $1:2^{1/3}$. При этом ширина полосы, как и ширина полосы октавного спектра, отнесенная к средней частоте, является постоянной.
Рекомендуемые средние частоты октав: 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 6300; 8000; 10 000; 12 500; 20 000 Гц.

Узкополосный спектр
В отличие от вышеупомянутых спектров, для оценки компонентов с узкополосным спектром частот можно использовать анализ Фурье ([3]). Этот анализ часто применяется при построении спектра в сложной, трехмерной форме. В качестве дополнительной оси используется время, что необходимо учитывать, например, при прогонке двигателя. Уровень звукового давления затем может отображаться в виде цветных графиков.

Звукоизоляция
Звукоизоляция достигается уменьшением воздействия звука за счет установки отражающей (поглощающей) стенки между источником звука и местом воздействия.

Звукопоглощение
В случае поглощения звука, звуковая энергия превращается в тепло при отражении звуковых волн, а также при их распространении в среде.

Коэффициент звукопоглощения
Коэффициент звукопоглощения α определяется отношением поглощенной энергии звука к падающей. При полном отражении $\alpha = 0$; при полном поглощении $\alpha = 1$.

Низкошумные конструкции
Конструкции, структурно оптимизированные с применением акустического анализа, для того чтобы свести к минимуму воздействие звука. Для оптимизации акустических характеристик новых конструкций используются методы моделирования и расчета.

Снижение уровня шума
Предполагается системное снижение уровня шума, во-первых, за счет применения низкошумных конструкций, во-вторых, за счет снижения распространения звука путем использования теплоизоляционных, демпфирующих и поглощающих материалов.

Единицы измерения шума

Для звукового поля обычно определяются среднеквадратичные значения величин и указываются скорректированные характеристики, зависящие от частоты звука. Это связано с тем, что шумомеры снабжены корректирующими контурами, подключая которые можно снизить чувствительность шумомера к низкочастотным и высокочастотным звукам, так чтобы приблизить частотные характеристики прибора к свойствам человеческого уха. Наиболее распространенными являются шумомеры с коррекцией А — они применяются, например, в автомобилестроении, и с коррекцией С — они используются, например, в авиастроении. При этом в обозначении величин дополнительно присваивается соответствующий индекс, например, дБ (А).

Уровень звуковой мощности
Мощность звука единичного источника звука оценивается уровнем звуковой мощности L_w. Он равен десятикратному десятичному логарифму отношения вычисленной мощности к эталонной мощности звука $P_0 = 10^{-12}$ Вт:

$$L_w = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right).$$

Мощность звука не может быть определена непосредственно. Она вычисляется, исходя из параметров звукового поля, которое образуется вокруг источника звука. Обычно для этого используются уровень звукового давления L_p или уровень интенсивности звука L_I.

Уровень звукового давления
Уровень звукового давления L_p равен десятикратному десятичному логарифму отношения среднеквадратичного значения звукового давления в квадрате к эталонному звуковому давлению $p_0 = 20$ мкПа:

$$L_p = 10 \log\left\{\frac{p_{eff}^2}{p_0^2}\right\} \text{ или}$$

$$L_p = 20 \log\left\{\frac{p_{eff}}{p_0}\right\}$$

Уровень звукового давления дается в децибелах (дБ). Уровень звукового давления в А-скорректированном значении L_{pA}, зависящим от частоты звука, часто используется для характеристики источника звука на расстоянии $d = 1$ м.

Уровень интенсивности звука

Уровень интенсивности звука L_I равен десятикратному десятичному логарифму отношения интенсивности звука к эталонной интенсивности звука $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²:

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Интенсивность звука измеряется с помощью акустического зонда.

Совместное действие двух или большего числа источников звука

При наложении двух независимых звуковых полей суммируются интенсивности звука или квадраты звуковых давлений. Суммарный уровень звука, являющийся следствием наложения звуковых полей отдельных источников звука, приведен в табл. 3.

Таблица 3. Суммарный уровень звука, получаемый при наложении звуковых полей отдельных источников звука

Разность между уровнями звука двух отдельных источников звука, дБ	Суммарный уровень звука = большему уровню звука одного из отдельных источников + дополнительному уровню звука, дБ
0	3,0
1	2,5
2	2,1
3	1,8
4	1,5
6	1,0
8	0,6
10	0,4

Таблица 4. Ориентировочные значения допустимых шумовых воздействий в соответствии с Технической инструкцией по шуму [6]

Зоны	Днем, дБ (А)	Ночью, дБ (А)
Индустриальные зоны в чистом виде	70	70
Зоны с преимущественно промышленными объектами	65	50
Смешанные зоны	60	45
Зоны с преимущественно жилыми кварталами	55	40
Жилые зоны в чистом виде	50	35
Курорты, больницы и др	45	35

Величины для оценки воздействия шума (защита от шума)

Избыточный шум

Избыточный шум, классифицируемый как нежелательный звуковой случай, зависит от следующих факторов:

- от самого шума, оцениваемого физическими величинами (например, частотой, уровнем звукового давления или звуковой мощности);
- от субъективного отношения пострадавшего к шуму;
- от состояния пострадавшего;
- от конкретной ситуации, в которой случился шум.

Защита от избыточного шума и, в частности, от шума окружающей среды приобретает все большее значение как экологическая проблема. Учет и оценка воздействия шума создают основу для эффективного его снижения.

Уровень звука

Воздействие шума на человека оценивается уровнем звука L_r (см. также DIN 45645-1, [4], в настоящее время ведутся работы по созданию стандарта ISO). Он характеризуется средним значением воздействия шума в течение всего времени воздействия (например, восьми рабочих часов), а уровень звука измеряется либо непосредственно, с помощью интегрального измерительного прибора, либо рассчитывается, исходя из измеренных звуковых давлений и относящихся к ним промежутков времени воздействия отдельных звуковых источников (см. также DIN 45641, [5]). Параметры воздействия шума, такие как пульсация (короткие сильные отклонения уровня звука от среднего уровня) и тональные шумы (преобладание одной или большего количества дискретных частот) могут учитываться как уровни звуковых ударов.

Эквивалент непрерывного уровня звука L_{Aeq}

При шумах, переменных во времени, средний А-скорректированный уровень звукового давления равен эквиваленту непрерывного уровня звука L_{Aeq}, описывающему среднее энергетическое воздействие в течение суммарного времени оценки (см. также DIN 45641)

В табл. 4 представлены ориентировочные значения оценочных уровней шумов (Германия, Техническая инструкция по шуму [6]), измеренных вблизи жилых домов (на расстоянии 0,5 м от открытого окна).

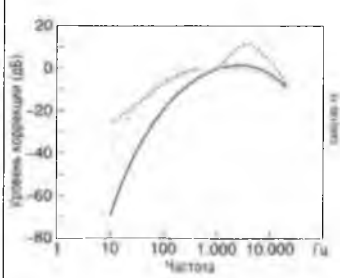
Эквивалент непрерывного уровня звука L_{den}
Эквивалент непрерывного уровня звука L_{den} является, в соответствии с новой Директивой ЕС 2002/49/ЕС ([7]), стандартным дескриптором шума подобно описанному выше эквивалентному уровню звука L_{Aeq}. Период оценки составляет один календарный год. Стандартный дескриптор для оскорбления шума аналогично вышеописанным.

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \cdot \left(12 \cdot 10^{\frac{L_d}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_e + 5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_n + 10}{10}}\right).$$

где L_d, L_e и L_n – значения уровня звука, соответственно, днем, вечером и ночью.

Уровень звуковой экспозиции
Уровень звуковой экспозиции (SEL) соответствует значению уровня постоянного звука длительностью 1 с. Он используется для выявления избыточного шума для решении задач в области сохранения природы.

Рис. 1. Скорректированные уровни звукового давления с учетом изменения чувствительности уха человека в зависимости от частоты



Воспринимаемые уровни шума

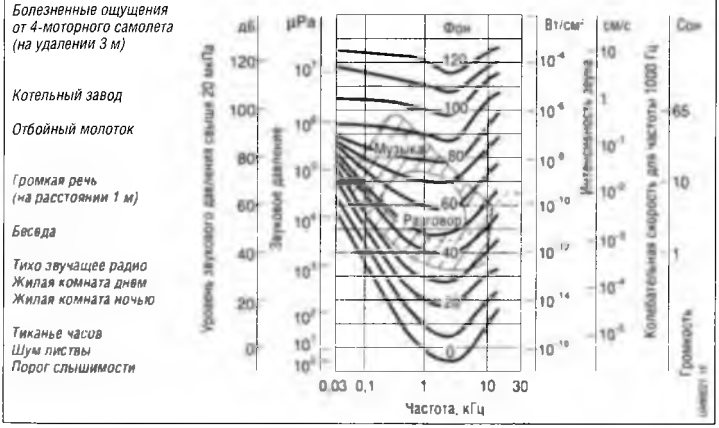
Ухо человека может различать примерно 300 уровней интенсивности звука и 3000–4000 различных частот (уровней основного тона) в быстрой временной последовательности и оценивать их в соответствии со сложными характеристиками. Таким образом, нет необходимости определять соответствие между субъективно воспринимаемыми уровнями шума и технически измеряемыми уровнями звука. Приблизительная аппроксимация субъективного ощущения уровня звукового давления обеспечивается A-, B- и C-скорректированными уровнями звукового давления, при которых принимается во внимание изменение чувствительности уха человека в зависимости от частоты (рис. 1).

Уровень громкости определяется в сонах. Измерение только уровней звукового давления не является достаточным только для определения раздражающего воздействия, вызываемого шумом. Едва различимый постукивающий шум может восприниматься как крайне раздражающий даже в шумных условиях окружающей среды.

Уровень громкости звука
Уровень громкости L_S, измеряемый в фонах, является сравнительным показателем интенсивности субъективного восприятия звука. Уровень громкости единичного звука (чистого тона или шума) определяется путем субъективного сравнения со стандартным звуком. Стандартный звук – это единичная продольная звуковая волна частотой 1000 Гц, воздействующая спереди на голову наблюдателя. Это понятие известно как «уровень громкости». Различие в уровне громкости от 8 до 10 фон воспринимается как удвоение громкости либо уменьшение в два раза.

Фон
В качестве единицы уровня громкости фон, как и децибел, не является единицей измерения, а представляет собой двадцатикратный десятичный логарифм звуковых давлений. Так как субъективное восприятие звука зависит от его частоты, то определенное значение тестируемого звука в дБ может не согласовываться со значением в дБ стандартного звука (за исключением эталонной частоты 1000 Гц), однако уровни громкости в фонах могут при этом совпадать. На рис. 2 показаны кривые равных уровней громкости (кривые Флетчера–Мэнсона, [8]).

Рис. 2: Распределение шумов
Соответствие шумов от различных источников объективным и субъективным шкалам, кривые равных уровней громкости, нормирующая кривая A по измерениям шумомера



Громкость в «сонах»

Громкость S - мера измерения субъективного ощущения уровней шума. Отправной точкой для определения сона служит представление, насколько громче или тише предполагаемый уровень воспринимаемого шума относительно конкретного стандарта. Уровень громкости L_S = 40 фон, по определению, соответствует громкости S = 1 сон. Удвоение или уменьшение в два раза громкости дает различие в уровне громкости примерно в 10 фон.

Существует стандарт громкости DIN для расчета характеристик неподвижного источника звука посредством использования третичных уровней (метод Цвикера, [9]). Этод метод учитывает частоту и способ экранирования в пределах слышимости.

Высота и частота тона

Спектр воспринимаемого звука может быть подразделен на 24 группы частот, в зависимости от слухового восприятия. В соответствии с этими группами определяются воспринимаемые уровни высоты тона. Распределение громкости/высоты тона может использоваться для количественного определения таких субъективных слуховых ощущений, как например тональность шума.

Список литературы

[1] DIN 1320: Acoustics, Terminology.
[2] DIN 1332: Acoustics, Symbols.
[3] B. Lenze: Einführung in die Fourier-Analysis, Logos Verlag, Berlin 2000.
[4] DIN 45645-1, 996-07: Determination of rating levels from measurement data – Part 1: Noise immission in the neighbourhood.
[5] DIN 45641, 1990-06: Averaging of sound levels.
[6] Sixth General Administrative Regulation on the Federal Immission Protection Law (Technical Instructions on Noise Abatement – TI Noise) of 26 August 1998 (GMBl No. 26/1998 P. 503).
[7] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.
[8] H. Fletcher, W. A. Munson: "Loudness, its definition, measurement and calculation", The Journal of the Acoustical Society of America, 1933, Volume 55, 82–108.
[9] DIN 45631: Calculation of loudness level from the sound spectrum; Eberhard Zwicker method.

Гидростатика

Плотность и давление

Хотя жидкости и сжимаемы в очень небольших пределах, во многих случаях они могут рассматриваться как несжимаемые. Кроме того, поскольку плотность жидкости слабо зависит от температуры, ее величину во многих расчетах можно принимать за постоянную.

Давление $p = dF/dA$ в жидкости, находящейся в покое, одинаково по всем направлениям. Если частью давления, зависящего от собственного веса жидкости (геодезическое давление), можно пренебречь, то гидростатическое давление считается одинаковым во всем объеме жидкости (например, в гидростатическом прессе).

Статическое давление в открытом сосуде

Давление жидкости, находящейся в открытом сосуде, зависит только от глубины (рис. 1). Закрытые емкости, такие как топливные баки и гидроприводы тормозов, оборудованные устройствами компенсации давления, также могут рассматриваться как открытые сосуды.

Давление: $p(h) = \rho g h.$

Сила, действующая на дно: $F_B = A_B \rho g h.$

Сила, действующая на боковые стенки: $F_S = 0{,}5 A_S \rho g h.$

Гидростатический пресс

По принципу гидростатического пресса (рис. 2) создается усилие, к примеру, в гидроприводе тормозов автомобиля или гидравлическом усилителе рулевого управления.

Давление. $p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$

Усилие на поршень. $F_1 = p A_1 = F_2 \frac{A_1}{A_2},$

$F_2 = p A_2 = F \cdot \frac{A_2}{A_1}$

Плавучесть

Плавучестью называется сила, действующая в направлении, обратном действию силы тяжести, и в сторону центра тяжести объема вытесненной жидкости. Эта сила соответствует весу жидкости, вытесненной погруженным в нее телом:

$F_A = m_F g = V_F \rho g.$

Тело находится на плаву при условии, что $F_A = F_G$.

Плавучесть позволяет легко и надежно измерять количество топлива в топливном баке с помощью аналоговых датчиков (поплавков).

Список литературы

[1] Boge, A.: Technische Mechanik. Vieweg + Teubner Verlag 2009.

[2] Bohl, W.; Elmendorf W.: Technische Stromungslehre. Vogel-Verlag, 2008.

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	м^2
A_B	Площадь основания	м^2
A_S	Площадь боковой стенки	м^2
F	Сила	Н
F_A	Выталкивающая сила	Н
F_B	Сила, действующая на дно	Н
F_G	Вес	Н
F_S	Сила, действующая на боковую стенку	Н
V_F	Объем вытесняемой жидкости	м^3
g	Ускорение свободного падения ($g = 9{,}81$)	м/с^2
h	Глубина жидкости	м
m_F	Масса вытесняемой жидкости	кг
p	Давление	Па = Н/м^2
ρ	Плотность	кг/м^3

Рис. 1. Распределение давления в жидкости, находящейся в состоянии покоя:
p – давление, h – глубина жидкости

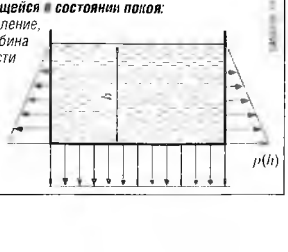
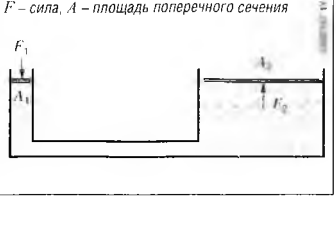


Рис. 2. Гидростатический пресс:
F – сила, A – площадь поперечного сечения



Гидромеханика

Основные принципы

Идеальная жидкость – несжимаемая и невязкая. Это означает, что в ней отсутствуют напряжения сдвига, а давление на элемент жидкости действует одинаково по всем направлениям. Однако фактически, если происходит деформация, вызванная смещением элементов жидкости, в ней должно преодолеваться сопротивление (рис. 1). Результирующее напряжение сдвига определяется по формуле Ньютона:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{v}{h}$$

Коэффициент пропорциональности η, называемый динамической вязкостью, в большой степени зависит от температуры. На практике часто используется кинематическая вязкость

$$v = \frac{\eta}{\rho},$$

так как ее можно очень легко определять с помощью капиллярного вискозиметра.

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	$м^2$
F	Сила	Н
F_A	Выталкивающая сила	Н
F_W	Сила сопротивления	Н
L	Характерная длина элемента потока	м
Q	Объемная скорость потока	$м^3/с$
R_e	Число Рейнольдсаг	–
c_n	Коэффициент аэродинамического сопротивления	–
d	Диаметр	м
g	Ускорение свободного падения ($g \approx 9{,}81$)	$м/с^2$
h	Высота	м
m	Масса	кг
m	Массовый расход	кг/с
p	Давление	Па = $Н/м^2$
t	Толщина	м
v	Скорость потока	м/с
α	Коэффициент сужения потока	–
η	Динамическая вязкость	Па с = Н $с/м^2$
μ	Коэффициент вытекания	–
υ	Кинематическая вязкость	$м/с^2$
ρ	Плотность	$кг/м^3$
φ	Коэффициент скорости	–
τ	Напряжение сдвига	$Н/м^2$

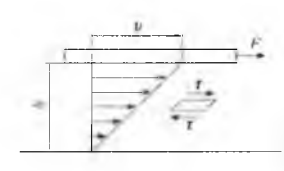
Поток без турбулентности, в котором смежные слои жидкости движутся раздельно и параллельно друг другу, и который в основном определяется вязкостью, называется ламинарным. Если скорость потока превышает некое предельное значение, в смежных слоях начинают образовываться водовороты, и поток становится турбулентным. Кроме скорости потока, переход ламинарного потока в турбулентный также зависит от числа Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\rho L v}{\eta} = \frac{L v}{\upsilon}.$$

При движении потока по трубе величина L в данной формуле принимается за диаметр трубы. Поток в трубе становится нестабильным или турбулентным при $R_e > 2300$.

Поскольку при движении газового потока с низкой скоростью (меньше скорости звука в 0,5 раза и ниже), сжатие незначительно, такой поток принимается за течение несжимаемой жидкости.

Рис. 1. Напряжение сдвига в жидкости:
τ – напряжение сдвига,
v – скорость потока,
h – высота,
F – сила



Основные уравнения гидромеханики

Наиболее важными в гидромеханики являются уравнения неразрывности и Бернулли. Этими основными уравнениями описываются законы сохранения массы и энергии в потоке жидкости.

Уравнение неразрывности

При установившемся состоянии удельный массовый расход, в соответствии с законом сохранения массы, должен быть одинаковым при любом поперечном сечении потока (рис. 2):

$$m = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \text{const}.$$

Для несжимаемых жидкостей ($\rho = \text{const}$), объемный расход должен быть также постоянным:

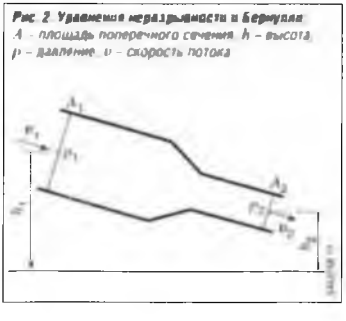
$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = \text{const}.$$

Уравнение Бернулли

Из уравнения неразрывности следует, что между A_1 и A_2 имеет место ускорение. В результате возрастает кинетическая энергия, что сопровождается падением давления $p_1 > p_2$ (рис. 2). В соответствии с законом сохранения энергии сумма статического давления p, кинетического давления и геодезического давления в потоке текущей жидкости является постоянной. Если не учитывать потери на трение, поток жидкости в наклонной трубе описывается выражением:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 .$$

Рис. 2. Уравнение неразрывности и Бернулли
A – площадь поперечного сечения, h – высота, p – давление, v – скорость потока



Вытекание жидкости из резервуара под давлением

Если соблюдается предварительное условие о том, что поперечное сечение выпускного отверстия намного меньше размеров резервуара (рис. 3), то в соответствии с уравнением неразрывности скорость v_1 пренебрежимо мала. Согласно уравнению Бернулли, скорость вытекания равна:

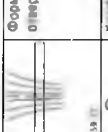
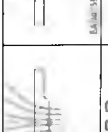
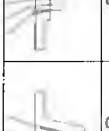
$$v_2 = \varphi\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2) + 2gh}.$$

Коэффициент скорости φ учитывает потери. Также при определении объемного расхода или объема истечения должно учитываться сужение струи; это сужение определяется коэффициентом сужения потока α. Объемный расход с учетом коэффициента сужения потока равен:

$$Q = \alpha\varphi A_2\sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2) + 2gh}.$$

Коэффициент скорости и коэффициент сужения потока часто выражаются через коэффициент вытекания $\mu = \alpha\varphi$ (табл. 2).

Таблица 2. Выпускные отверстия

Форма отверстия	Коэффициент скорости φ	Коэффициент сужения потока α	Коэффициент вытекания μ
	0.97	0.61–0.64	0.59–0.62
	0.97–0.99	1.0	0.97–0.99
	0.95–0.97	$(d/D)^2$: 0.4 → 0.87; 0.6 → 0.90; 0.8 → 0.94; 1.0 → 1.0	0.82–0.97

Сопротивление тел, находящихся в потоке жидкости

Сила сопротивления тела (например, кузова), погруженного в поток жидкости, равна:

$$F_W = \frac{1}{2} c_w A \rho v^2,$$

где A – площадь поперечного сечения тела, на которое воздействует поток жидкости; c_w – коэффициент гидродинамического сопротивления, зависящим от формы тела, находящегося в потоке жидкости.

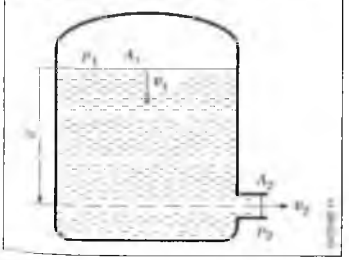
Поскольку точно рассчитать сопротивление потоку даже простых тел очень сложно, сопротивление потоку обычно определяется экспериментальным путем. Если размеры тел большие, то измерения проводятся на масштабных моделях. Из-за геометрического подобия величины энергии (кинетическая энергия, работа трения) в исходном и смоделированном потоках должны быть пропорциональны. Эта пропорциональность обозначается числом Рейнольдса.

В основном, два потока в гидродинамических выражениях одинаковы, если их числа Рейнольдса равны. Поскольку что даже сложные геометрические тела состоят из простых базовых фигур, обтекаемые поверхности могут быть смоделированы с использованием таких фигур, показанных в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициент гидродинамического сопротивления c_w

Форма тела *L – длина, t – толщина,* R_e *– число Рейнольдса*	c_w
Круглая пластина	1,11
Тарелка	1,33
Сфера $R_e < 200000$ $R_e > 250000$	0,47 0,20
Узкое тело вращения $L/t = 6$	0,05
Длинный цилиндр $R_e < 200000$ $R_e > 450000$	1,0 0,35
Длинная пластина $L/t = 30$ $R_e = 500000$ $R_e = 200000$	0,78 0,66
Длинное крыло $L/t = 18$ $R_e = 10^6$ $L/t = 8$ $R_e = 10^6$ $L/t = 5$ $R_e = 10^6$ $L/t = 2$ $R_e = 2 \cdot 10^5$	0,2 0,1 0,08 0,2

Рис. 3. Вытекание жидкости из резервуара под давлением:
1 – плотность, поперечного сечения, h – высота, p – давление, v – скорость потока



Список литературы

[1] Boge, A.: Technische Mechanik. Vieweg+Teubner Verlag, 2009.
[2] Bohl, W.; Elmendorf W.: Technische Str mungslehre. Vogel-Verlag, 2008.

Термодинамика

Энтальпия (теплосодержание)

Энтальпия (теплосодержание) Q_i – это количество теплоты, в которое преобразуется твердое, жидкое или газообразное тело массой m и удельной теплоемкостью ср при определенной температуре T:

$$Q_i = c_p m T = c_p V \rho T .$$

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Обозначение	Единицы измерения
A	Площадь поперечного сечения	м^2
c	Удельная теплоемкость c_p – при изобарическом процессе (постоянное давление), c_v – при изохорическом процессе (постоянный объем)	Дж/(кг К)
k	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м^2 К)
m	Масса	кг
p	Давление	Па = Н/м^2
Q	Теплота	Дж
Q_i	Энтальпия (теплосодержание)	Дж
$\dot{Q}$	Тепловой поток dQ/dt	Вт
R_m	Молярная газовая постоянная = 8,3145 (постоянная для всех газов)	Дж/(моль·К)
R_i	Удельная газовая постоянная $R_i = R_m/M$ (MМ – молекулярная масса)	Дж/(моль·К)
S	Энтропия	Дж/К
s	Расстояние	м
T	Термодинамическая температура	К
ΔT	Разность температур $= T_1 - T_2$ T_1 – более высокая температура, T_2 – более низкая температура	К
V	Объем	м^3
v	Удельный объем	м^3/кг
W	Работа	Дж
t	Время	с
α	Коэффициент теплоотдачи α_a – наружный, α_i – внутренний	Вт/(м^2 К)
ε	Коэффициент излучения	–
λ	Теплопроводность	Вт/(м К)
ρ	Плотность	кг/м^3
σ	Постоянная Стефана-Больцмана = 5,6704 10^{-8}	Вт/(м^{2}К^4)

Пересчет не допускаемых к употреблению единиц измерения:
1 ккал (килокалория) = 4186,8 Дж ≈ 4,2 кДж;
1 ккал/(м·ч·град) = 1,163 Вт/(м·К).

Теплопередача

Существуют три формы теплопередачи:
- теплопроводность – способность твердого, жидкого или газообразного тела переносить тепло;
- конвекция – теплота, переносимая движущимися частицами жидкого или газообразного тела. При свободной конвекции характер движения частиц вызван неоднородностью среды; при вынужденной конвекции движение частиц поддерживается искусственно;
- тепловое излучение – передача тепла от одного тела к другому благодаря испусканию и поглощению электромагнитных волн.

Теплопроводность

Тепловой поток, распространяющийся в теле с постоянной площадью поперечного сечения A между двумя параллельными плоскостями поперечного сечения, расположенными на расстоянии s, при разности температур $\Delta T = T_1 - T_2$ равен:

$$Q = \frac{\lambda}{s} A \ \Delta T .$$

Тепловое излучение

Безвоздушное пространство и воздух проницаемы для теплового излучения. Твердые тела и большая часть жидкостей для теплового излучения непроницаемы, также как и различные газы в определенных диапазонах длин волн.

Тепловое излучение, исходящее от поверхности площадью A при температуре T, равно:

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4 ,$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 К^4) – постоянная излучения абсолютно черного тела; ε – коэффициент излучения поверхности (см. табл. 2).

Теплопередача через стену

Тепловой поток, проходящий через стену площадью A и тощиной s при разности температур ΔT равен.

$$Q = k A \Delta T .$$

Коэффициент теплопередачи k вычисляется из формулы (α_i и α_a см. табл 3)

Таблица 2. Коэффициент излучения ε
в области температур 300 °С (573 К)

Абсолютно черное тело	1,00
Алюминий необработанный	0,07
Алюминий полированный	0,04
Лед	0,90
Эмалевая краска, белая	0,91
Стекло	0,93
Чугун шероховатый, оксидированный	0,94
Чугун обточенный	0,44
Дерево гладкое	0,90
Известковый раствор, шероховатый, белый	0,93
Медь оксидированная	0,64
Медь полированная	0,05
Латунь матовая	0,22
Латунь полированная	0,05
Никель полированный	0,07
Масло	0,82
Бумага	0,80
Фарфор глазированный	0,92
Сажа	0,93
Серебро полированное	0,02
Сталь матовая, оксидированная	0,96
Сталь полированная, без масла	0,06
Сталь полированная, с маслом	0,40
Вода	0,92
Кирпич	0,93
Цинк матовый	0,23
Цинк полированный	0,05
Олово полированное	0,06

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a},$$

Сопротивление теплопроницаемости

Сопротивление теплопроницаемости суммируется из сопротивлений теплопроницаемости отдельных слоев стены (см. табл. 4):

$$\frac{s}{\lambda} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \ldots$$

Таблица 3. Коэффициент теплоотдачи α
(конвекция + излучение)

Вид материала, поверхности стен и т. д.	α_1 и α_a, Вт/(м² · К)
Естественное движение воздуха в закрытой комнате.	
у поверхностей стен	8
с внутренней стороны окон	8
с наружной стороны окон	11
Естественное движение воздуха от полов и потолков.	
снизу вверх	8
сверху вниз	6
Принудительное движение воздуха на плоскую стену. при средней скорости ветра w = 2 m/s	15
Вода, поступающая на плоскую стену:	
спокойная	500–2000
льющаяся	2000–4000
бурная	2000–6000

Таблица 4. Сопротивление теплопроницаемости воздушных слоев s/λ
(теплопроводность + конвекция + излучение)

Расположение слоя воздуха	Толщина слоя воздуха, мм	Сопротивление теплопроницаемости s/λ, м² К/Вт
Вертикальный слой воздуха	10	0,14
	20	0,16
	50	0,18
	100	0,17
	150	0,16
Горизонтальный слой воздуха тепловой поток, поступающий снизу вверх	10	0,14
	20	0,15
	50	0,16
Горизонтальный слой воздуха тепловой поток, поступающий сверху вниз	10	0,15
	20	0,18
	50	0,21

Абсолютно черное тело

«Абсолютно черное тело» поглощает все падающее на него тепловое излучение; поэтому, когда оно нагревается, то излучает максимальное количество света, которое может выделить тело

Законы термодинамики

Первый закон термодинамики

Энергия не возникает из ничего и не исчезает бесследно. Энергия может лишь преобразовываться в другие виды энергии, например, тепловая энергия – в механическую. В замкнутой системе энергия является постоянной. Система считается замкнутой, если не происходит перехода вещества в нее и за ее пределы, т.е. если масса системы остается постоянной. Исходя из этого, можно принять следующую формулировку: в замкнутой системе сумма всех изменений ее внутренней энергии равна нулю.

Второй закон термодинамики

Все естественные и искусственные процессы преобразования энергии необратимы, т.е. они не полностью обратимы. Так, теплота не может полностью превращаться в другой вид энергии, например, в механическую энергию, именно поэтому энергия, которая может быть преобразована в механическую энергию, всегда меньше теоретического оптимума. Следовательно, все процессы, связанные с трением, необратимы. Теплота, согласно второму закону термодинамики, в естественных условиях не может передаваться от тела с более низкой температурой к телу с более высокой температурой.

Энтропия

Энтропия – мера теплообмена между двумя телами. Она не является непосредственно измеряемой величиной, как давление или температура; оценивать можно только изменение энтропии. Энтропия, по словам Людвига Больцмана (1877), может также интерпретироваться как вероятность распределения молекул двух газов. В замкнутой системе изменение энтропии идеального, обратимого процесса равно нулю. Обратимым называется процесс, который может без потерь возвращаться к своему первоначальному состоянию. Противоположны такому процессу необратимые процессы, которые встречаются в технологии (например, процессы, связанные с трением, теплопроводимостью или смесеобразованием). Существующие в реальном мире необратимые процессы обнаруживают увеличение энтропии. Поэтому энтропия подходит для описания явлений, сопровождаемых потерями на трение. Еще одним примером процессов, связанных с трением, являются попытки Джеймса Прескотта Джоуля увеличить температуру в сосуде за счет использования мешалки, однако это необратимый процесс. Передача тепла возможна только от горячего предмета к холодному, а не наоборот. Феномен потерь (например, потерь течения, связанных с вязкостью) при дросселировании или при смешивании двух жидкостей, движущихся без расслоения и диффузии, объясняется энтропией.

Энергия

Наиболее важной формой энергии в термодинамике является тепловая энергия. Существуют также другие формы энергии, например, кинетическая, электрическая и химическая.

Эксергия

Эксергия – это энергия, равная максимально полезной работе, которая может быть совершена при переходе из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Фактическая доля эксергии понижается из-за потерь (на передачу тепла, трение, химические реакции, процессы перемешивания).

Анергия

Соответственно, анергия обозначает часть энергии, которая не может быть превращена в работу. Энергия, таким образом, состоит из эксергии и анергии.

Изменения состояния идеального газа

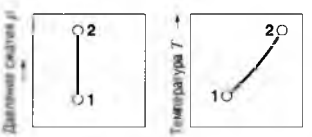
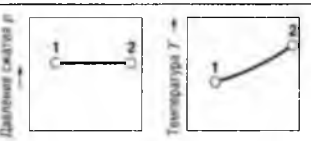
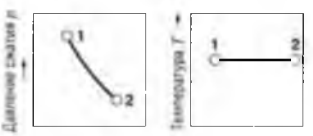
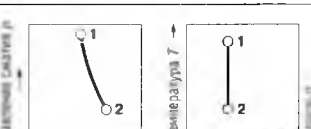
Действительные изменения объема, давления или температуры газов заменяются упрощенной моделью изменений состояния идеального газа или аппроксимируются последовательностью изменениий состояния идеального газа. Прикладной интерес представляют изохорный (при постоянном объеме), изобарный (при постоянном давлении), изотермический (при постоянной температуре) и адиабатический обратимый (без обмена теплоты) процессы. Адиабатический обратимый процесс часто используется при быстрых изменениях состояния.

В Таблице 5 приведены данные для идеального газа и замкнутой системы, масса которой остается постоянной. Расчет выполненных работ производится с использованием интеграл $\int pdV$. Подведение и убывание теплоты являются следствием первого закона термодинамики, энтропия – второго закона.

Список литературы

[1] Stephan, P.; Schaber, K.; Stephan, K.; Mayinger, F.: Thermodynamik. 17th Edition Volume 1, Springer 2007.

Таблица 5. Изменение состояния идеального газа

Процесс изменения состояния	Диаграмма состояния	Уравнения V – объем; p – давление; T – температура, S – энтропия, Q_{12} – изменение теплоты; W_{12} – работа; κ – показатель адиабаты, R – газовая постоянная
Изохорный		$V = V_1 = V_2 = \text{const}$ $p_1/p_2 = T_1/T_2$ $Q_{12} = \frac{m R}{\kappa - 1}(T_2 - T_1)$ $W_{12} = 0$
Изобарный		$p = p_1 = p_2 = \text{const}$ $V_1/V_2 = T_1/T_2$ $Q_{12} = \frac{m R \kappa}{\kappa - 1}(T_2 - T_1)$ $W_{12} = p\,(V_2 - V_1)$
Изотермический		$T = T_1 = T_2 = \text{const}$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$ $Q_{12} = -p_1 V_1 \ln(p_2/p_1)$ $W_{12} = -p_1 V_1 \ln(p_2/p_1)$
Адиабатический обратимый		$S = S_1 = S_2 = \text{const}$ $p_1 V_1^{\kappa} = p_2 V_2^{\kappa}$ $V_2/V_1 = (T_1/T_2)^{1/(1-\kappa)}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(\kappa-1)/\kappa}$ $Q_{12} = 0$ $W_{12} = \frac{1}{\kappa - 1} p_1 V_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1\right)$

Электротехника

Электромагнитные поля

В электротехнике рассматриваются электромагнитные поля и их действие. Эти поля вызываются электрическими зарядами (в каждом случае состоящими из множества элементарных электрических зарядов). В физике, при рассмотрении совокупности электрического и магнитного полей, не установлено, что является причиной, а что следствием. Статические заряды создают электрическое поле, в то время как движущиеся заряды – магитное. Взаимосвязь электрического и магнитного полей со статическими и движущимися зарядами описывается уравнениями Максвелла [1].

Присутствие поля обнаруживается благодаря его силовому воздействию на другие электрические заряды. Сила, воздействующая на точечный электрический заряд Q в электрическом поле, называется силой Кулона. Она вызывает отталкивание между одноименными зарядами и притяжение между разноименными. Сила, возникающая в вакууме между двумя точечными электрическими зарядами Q_1 and Q_2 при расстоянии a между ними, равна:

$$F=\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 a^2},$$

где ε_0= 8,854 10^{-12} Ф/м – электрическая постоянная, также называемая диэлектрической проницаемостью вакуума.

Сила, воздействующая на заряд, движущийся в магнитном поле, называется силой Лоренца. Она же является причиной взаимодействия двух параллельных проводников, по которым протекают токи I_1 и I_2. Сила притяжения в вакууме между двумя параллельными проводниками длиной l, расположенными друг от друга на расстоянии a, равна:

$$F=\frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a},$$

где μ_0=1,257 10^{-6} Гн/м – магнитная постоянная, также называемая магнитной проницаемостью вакуума.

Электрическое поле

Сила, действующая на статический электрический заряд, указывает на наличие электрического поля. Электростатическое поле описывается нижеследующими величинами.

Электрический потенциал φ(P) и напряжение U
Электрический потенциал φ(P) в точке P– мера работы, требуемой для переноса заряда Q из исходной точки в точку P:

$$\varphi(\mathrm{P})=\frac{W(\mathrm{P})}{Q}.$$

Напряжение U – это разность потенциалов (относительно некоторой исходной точки) между двумя точками P_1 и P_2:

$$U=\varphi(\mathrm{P}_1)-\varphi(\mathrm{P}_2).$$

Напряженность электрического поля E
Напряженность электрического поля E в точке P зависит от ее положения в зоне действия заряда. Она описывается максимумом градиента потенциала в точке P. Напряженность электрического поля в точке, расположенной на расстоянии a от положительного точечного заряда Q_1, равна:

$$E=\frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 a^2}.$$

Вектор напряженности электрического поля направлен от положительного точечного заряда Q_1. На положительный заряд Q_2 в точке P в том же направлении, что и вектор напряженности электрического поля, действует сила:

$$F=Q_2 E.$$

Электрическое поле и вещество
Электрическое поле в поляризованном (диэлектрическом) материале создает электрический диполь (состоящий из положительного и отрицательного зарядов $\pm Q$, расположенных на расстоянии a; произведение $Q\,a$ называется дипольным моментом). Дипольный момент в единицу объема называется электрической поляризованностью M. Электрическое смещение D, означающее плотность электрического потока смещения, определяется по формуле:

$$D=\varepsilon E=\varepsilon_0\varepsilon_r E=\varepsilon_0 E+M,$$

где $\varepsilon=\varepsilon_0\cdot\varepsilon_r$ – диэлектрическая постоянная; ε_0 – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); ε_r – диэлектрическая

постоянная (относительная диэлектрическая проницаемость). Для воздуха $\varepsilon_r = 1$; другие величины см. в разделе «Изоляционные материалы».

Параметр

$$w_e = \frac{1}{2} ED$$

называется плотностью энергии электрического поля. При ее умножении на объем получаем электрическую энергию электрического поля W_e.

Конденсатор

Конденсатором называется устройство, состоящее из двух металлических тел (электродов), разделенных между собой диэлектриком. При прикладывании к конденсатору напряжения, электроды заряжаются одинаково сильно, но разноименно. Полученный в результате заряд Q равен:

$$Q = CU,$$

где C – емкость конденсатора. Она зависит от геометрической формы электродов, расстоя-

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

(Дополнительные условные обозначения и единицы измерения – в тексте)

Обозначение	Наименование величины	Единицы измерения системы СИ
A	Площадь	м²
a	Расстояние	м
B	Магнитная индукция	Тл = Вб/м² = В с/м²
C	Электрическая емкость	Ф = Кл/В
D	Электрическое смещение	Кл/м²
E	Напряженность электрического поля	В/м
F	Сила	Н
f	Частота	Гц
G	Электрическая проводимость	См = 1/Ом
G	Коэффициент усиления антенны	дБ
H	Напряженность магнитного поля	А/м
I	Сила тока	А
J	Магнитная поляризованность	Тл
k	Электрохимический эквивалент	кг/Кл (обычно применяется г/Кл)
L	Индуктивность	Гн = Вб/А = В · с/А
l	Длина	м
M	Электрическая поляризованность	Кл/м²
P	Мощность	Вт = В А
P_s	Полная мощность	В А
P_q	Реактивная мощность	вар = В А
Q	Количество электричества, электрический заряд	Кл = А · с
q	Площадь поперечного сечения	м²
R	Электрическое сопротивление	Ом = В/А
T	Температура	К
t	Время	с
r	Радиус	м
r	Отражательная способность	-
S	Плотность энергии электромагнитного поля	Вт/м²
s	Коэффициент стоячей волны	–
U	Напряжение	V
V	Магнитное напряжение	А
W	Работа, энергия	Дж = Вт с
W_e	Энергия электрического поля	Вт·с
W_m	Энергия магнитного поля	Вт с
w_e	Плотность энергии электрического поля	Вт·с/м³
w_m	Плотность энергии магнитного поля	Вт·с/м³
w	Число витков	–
Z	Полное сопротивление	Ом
α	Геометрический угол	° (градус)
ε	Диэлектрическая постоянная	Ф/м = Кл/(В м)
ε_0	Электрическая постоянная = 8,854 · 10^{-12} Ф/м	
ε_r	Относительная диэлектрическая проницаемость	-
λ	Длина волны	м
Θ	Магнитодвижущая сила	А
μ	Магнитная проницаемость	Гн/м = В·с/(А м)
μ_0	Магнитная постоянная = 1,257 10^{-6} Гн/м	
μ_r	Относительная магнитная проницаемость	-
ρ	Удельное электрическое сопротивление	Ом м = 10^6 Ом мм²/м
σ	Удельная электропроводность (= 1/ρ)	1/(Ом · м) = 10^{-6} м/(Ом мм²)
Φ	Магнитный поток	Wb = Vs
φ	Угол смещения фазы	° (градус)
φ (P)	Потенциал в точке P	В
ω	Угловая частота (= 2 π f)	Гц

ния между ними и диэлектрической проницаемости диэлектрика. В таблице 2 приведены емкости для разных типов конденсаторов и проводников с разным расположением.
Емкость конденсаторов при последовательном и параллельном соединении определяется по формулам:

$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ (последовательное соединение, рис. 1, a),

$C_{total} = C_1 + C_2$ (параллельное соединение, рис. 1, b).

На рис. 2 показан плоский конденсатор, состоящий из двух вставленных друг в друга конденсаторов, пластины которых соединены параллельно и действуют как электроды.

Энергия заряженного конденсатора (с зарядом Q, напряжением U, емкостью C) равна:

$$W = \frac{1}{2} Q U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} C U^2 .$$

Постоянный электрический ток и напряжение постоянного тока

Движущиеся заряды создают электрический ток, который характеризуется силой тока I, измеряемой в амперах. Для постоянного тока его направление и сила не зависят от времени. Электрическая система автомобиля, питается, с другой стороны, напряжением постоянного тока, которое также не зависит от времени. При этом электрический ток, протекающий в цепях системы электрооборудования автомобиля, обычно зависит от времени. Во многих случаях зависимый от времени электрический ток, как например постоянный ток, может быть управляем.

Направление электрического тока и его измерение

Направление электрического тока от положительного полюса источника тока к отрицательному обозначается как положительное (в действительности электроны перемещаются от отрицательного полюса к положительному).

Рис. 1. Соединение конденсаторов:
a – последовательное соединение,
b – параллельное соединение

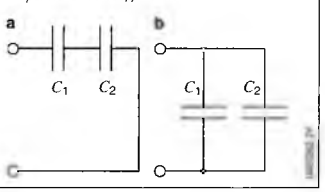


Рис. 2. Устройство плоского конденсатора

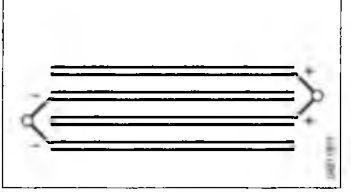


Таблица 2. Емкость C для проводников разного расположения

Плоский конденсатор с n-параллельными пластинами	$C = (n-1)\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{a}$	ε_r, ε_0 n A a	относительная диэлектрическая проницаемость количество пластин площадь поверхности одной пластины расстояние между пластинами
Параллельные проводники (двухпроводная линия)	$C = \frac{\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 l}{\ln\left(\frac{a+\sqrt{a^2-4r^2}}{2r}\right)}$	l a r	длина двухпроводной линии расстояние между проводами радиус сечения провода
Коаксиальные провода (цилиндрический конденсатор)	$C = \frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 l}{\ln(r_2/r_1)}$	l r_2, r_1	длина провода радиусы сечения провода, где $r_2 > r_1$
Провод, висящий над землей	$C = \frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 l}{\ln\left(\frac{a+\sqrt{a^2-r^2}}{r}\right)}$	l a r	длина провода расстояние от провода до земли радиус сечения провода
Шар по отношению к удаленной поверхности	$C = 4\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 r$	r	радиус шара

Измерение электрического тока производится амперметром (А), включенным в электрическую цепь последовательно; напряжение измеряется вольтметром (V), подключаемым параллельно тем точкам электрической цепи, напряжение между которыми надо измерить (рис. 3).

Принятое направление электрического тока и напряжения показывается стрелкой. В соответствии с этой ориентацией, напряжению и электрическому току присваивается знак. В случае положительного напряжения и электрического тока, стрелка указывает направление от положительного полюса (+) к отрицательному (–).

Закон Ома

Закон Ома описывает зависимость между напряжением U и силой тока I в твердых и жидких электрических проводниках:

$$U = RI .$$

Коэффициент пропорциональности R называется омическим сопротивлением, которое измеряется в Омах (Ом). Величина, обратная сопротивлению, называется электрической проводимостью G, измеряемой в Сименсах (См):

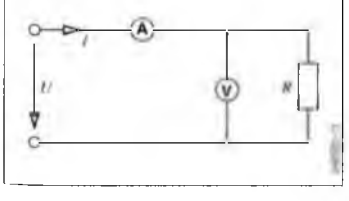
$$G = \frac{1}{R} .$$

Омическое сопротивление

Омическое сопротивление материала зависит от его вида и размеров. Для твердого провода:

$$R = \frac{\rho l}{q} = \frac{l}{q\sigma} ,$$

Рис. 3. Измерение электрического тока и напряжения:
R – *потребитель,*
A – *амперметр, включенный последовательно,*
V – *вольтметр, включенный параллельно*



где ρ – удельное сопротивление, Ом·мм²/м; $\sigma = 1/\rho$ – электропроводность, м/(Ом·мм²); l – длина провода, м; q – площадь поперечного сечения провода, мм².

Для трубы (изнутри наружу):

$$R = \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\frac{1}{2\pi l\sigma} ,$$

где l – длина трубы, м; r_2, r_1 – наружный и внутренний радиусы трубы, м.

Сопротивление металлов с повышением температуры увеличивается:

$$R_T = R_{20}[1 + \alpha(T - 20\ °C)] ,$$

где
R_T – сопротивление при температуре T;
R_{20} – сопротивление при температуре 20 °C;
α – температурный коэффициент, [1/K] (= [1/°C]);
T – температура, [°C].

Работа и мощность

В резисторе, через который проходит электрический ток, совершается работа, которая за время t преобразуется в теплоту или другой вид энергии (с омическим сопротивлением R, напряжением U и силой тока I):

$$W = UIt = RI^2 t .$$

При этом мощность равна:

$$P = UI = RI^2 .$$

Законы Кирхгофа

Первый закон: закон электрического тока

Для каждой точки (узла) разветвления сумма втекающих электрических токов равна сумме вытекающих из этой точки электрических токов.

Второй закон: закон напряжения

Для любого замкнутого контура разветвленной цепи сумма всех падений напряжений на участках цепи равна сумме электродвижущих сил источников в этом контуре.

Электрические цепи постоянного тока

Цепь с потребителем

$U = (R_a + R_i) I$ (рис. 4),

где
R_a – омическое сопротивление потребителя;
R_i – сопротивление линии.

Цепь заряда аккумуляторной батареи

$U - U_0 = (R_v + R_i) I$ (рис. 5),

где
U – напряжение сети;
U_0 – напряжение на батарее при разомкнутой цепи (электродвижущая сила);
R_v – добавочное сопротивление;
R_i – внутреннее сопротивление батареи.

Условие заряда: $U > U_0$ (напряжение заряда больше, чем напряжение на батарее при разомкнутой цепи).

Рис. 4. Цепь с потребителем:
U – напряжение;
I – сила тока;
R_i – сопротивление потребителя;
R_i – сопротивление линии

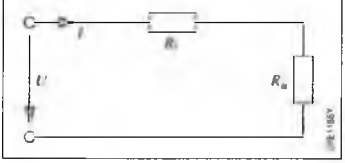
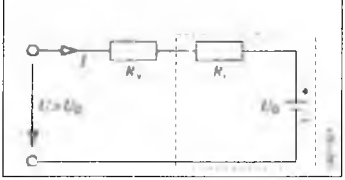


Рис. 5. Цепь заряда аккумуляторной батареи:
U – напряжение сети,
U_0 – напряжение на батарее при разомкнутой цепи,
R_v – добавочное сопротивление,
R_i – внутреннее сопротивление батареи



Последовательное соединение резисторов

$R_{total} = R_1 + R_2$ (рис. 6),

$U = U_1 + U_2$.

В обоих резисторах – одинаковая сила тока I (первый закон Кирхгофа).

Параллельное соединение резисторов

$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ или $G_{total} = G_1 + G_2$,

$I = I_1 + I_2$; $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ (рис. 7).

Напряжение U на всех резисторах одинаково (второй закон Кирхгофа).

Измерение сопротивления

Сопротивление можно установить измерением электрического тока или напряжения, а также непосредственным измерением с использованием омметра или измерительного моста. Измерительные мосты используются, например, в датчиках давления – при подключении тензодатчиков.

Широко используется четырехпроводный метод измерения сопротивления, особенно

Рис. 6. Последовательное соединение резисторов:
U – напряжение;
I – сила тока;
R – сопротивление

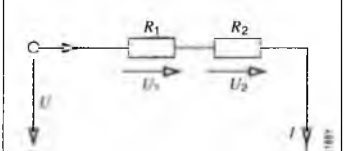
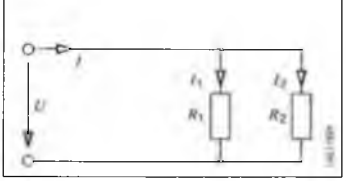


Рис. 7. Параллельное соединение резисторов:
U – напряжение,
I – сила тока,
R – сопротивление



малых значений (рис. 8). Для того чтобы предотвратить погрешность из-за влияния переходного сопротивления в точках подключения, используются две пары проводов. По одной паре на измеряемое сопротивление подается небольшой электрический ток. С помощью другой пары с измеряемого сопротивления на вольтметр подается падение напряжения. При подсоединении проводов к выводам измеряемого двухполюсника токовые провода не касаются проводов напряжения, так что переходные сопротивления в местах контактов не включаются в измерительную цепь.

Рис. 8. Четырехпроводное измерение сопротивления:
U – напряжение;
I – сила тока,
R – сопротивление,
A – амперметр, V – вольтметр

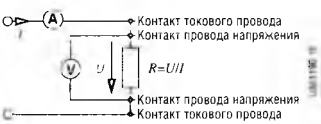
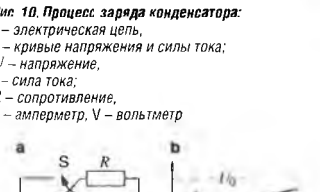


Рис. 9. Векторная диаграмма, конденсатор:
û – напряжение;
î – сила тока



Рис. 10. Процесс заряда конденсатора:
a – электрическая цепь,
b – кривые напряжения и силы тока;
U – напряжение,
I – сила тока;
R – сопротивление,
A – амперметр, V – вольтметр



Переменный электрический ток

Зависимости, используемые при описании постоянного электрического тока и постоянного напряжения, также применимы в более или менее измененной форме и к переменным электрическому току и напряжению. В частности, закон Ома и законы Кирхгофа могут применяться без изменений.

Заряд и разряд конденсатора

Когда электрический ток проходит через конденсатор, его заряд Q изменяется:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Таким образом, существует связь между силой тока I и напряжением U на конденсаторе емкостью C:

$$I = \frac{d(CU)}{dt}.$$

В этом случае сила тока I подводится к пластинам конденсатора, имеющим заряд Q, между которыми существует напряжение U.

Примеры (емкость C постоянна с течением времени):
- напряжение постоянного тока U:
  ⟶ сила тока $I = 0$;
- напряжение начала разряда U_0, постоянная сила тока I:
  ⟶ напряжение $U = U_0 + It$;
- напряжение гармоническое (синусоидальное), описываемое формулой $U = \hat{u}\sin(\omega t)$:
  ⟶ электрический ток косинусоидальный, описываемый формулой
  $I = \omega C\hat{u}\cos(\omega t) = \omega C\hat{u}\sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$,

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, зависящая от частоты f, $\hat{u}$ – амплитуда напряжения; $\hat{\imath} = \omega C\hat{u}$ – амплитуда электрического тока. Действующие значения $u_{\text{eff}} = \hat{u}/\sqrt{2}$ и $i_{\text{eff}} = \hat{\imath}/\sqrt{2}$ также используются вместо амплитуд.

При протекании через конденсатор переменного (гармонического) электрического тока векторы электрического тока и напряжения сдвинуты на угол $\varphi = +\pi/2$. Это свойство иллюстрирует векторная диаграмма (рис. 9).

На рис. 10 показана электрическая цепь, в которой конденсатор заряжается через сопротивление, установленное со стороны источника напряжения постоянного тока U_0 (рис. 10), или разряжается через сопротивле-

ние. Решающим фактором заряда и разряда конденсатора является постоянная времени $\tau = RC$.

Процесс заряда

$$I = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U = U_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

Процесс разряда

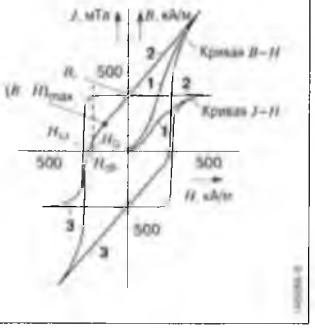
$$I = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где U_0 – напряжение заряда или напряжения начала разряда;
I – зарядная или разрядная сила тока;
$I_0 = U_0/R$ – сила тока начала заряда;
R – зарядное или разрядное сопротивление;
U – напряжение на конденсаторе.

Зарядный и разрядный электрические токи противоположно направлены.

Рис. 11. Петля гистерезиса (например, для твердого феррита):
1 – кривая первоначального намагничивания;
2, 3 – размагничивание;
H – напряженность магнитного поля;
B – магнитная индукция;
J – магнитная поляризованность,
J_s – поляризованность насыщения;
B_r – остаточная магнитная индукция;
H_{cB}, H_{cJ} – коэрцитивная сила;
H_G – граничная напряженность магнитного поля



Магнитное поле

Магнитное поле образуется движущимися электрическими зарядами, токонесущими проводниками, намагниченными телами или переменным электрическим полем. Магнитное поле проявляется в его действии на движущийся электрический заряд (сила Лоренца) или в образовании магнитных диполей (одноименные полюса отталкиваются, разноименные полюса притягиваются).

Магнитные поля характеризуются вектором магнитной индукции B. Проводник, находящийся под силой тока I_1 создает на расстоянии a магнитную индукцию, величина которой определяется по формуле:

$$B = B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$$

Эта магнитная индукция притягивает второй параллельно расположенный проводник длиной l, по которому проходит электрический ток I_2, с силой

$$F = B_1 I_2 l.$$

Магнитная индукция может быть определена путем измерения напряжения, возникающего при изменении магнитного поля в петлевом проводнике:

$$U = \frac{d\Phi}{dt},$$

где
$d\Phi$ – изменение магнитной индукции в петлевом проводнике; dt – изменение времени.

Магнитная индукция B находится в следующей зависимости с магнитным потоком Φ (q – площадь поперечного сечения):

$$\Phi = Bq.$$

Зависимость магнитной индукции в вакууме от напряженности магнитного потока H определяется уравнением:

$$H = \frac{B}{\mu_0}$$

Магнитное поле и вещество
В материальной среде магнитная индукция B теоретически состоит из двух компонентов. Один возникает от приложенного поля ($\mu_0 H$), другой – от материальной среды (J) (см. также взаимосвязь между плотностью электрического смещения и напряженностью электрического поля).

$B = \mu_0 H + J,$

где J – магнитная поляризованность, характеризующая вклад материальной среды в магнитную индукцию. Физически J обозначает магнитный дипольный момент каждой единицы объема и в целом является функцией напряженности магнитного поля H. Для многих материалов $J >> \mu_0 H$ и пропорциональна H. Тогда:

$B = \mu_r \mu_0 H,$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; в вакууме $\mu_r = 1$.

Величина

$$w_m = \frac{1}{2} B H$$

называется плотностью энергии магнитного поля. При ее умножении на объем получается энергия магнитного поля W_m.

В соответствии со значением относительной магнитной проницаемости материалы делятся на три группы:

Диамагнитные материалы

μ_r не зависит от напряженности магнитного поля и составляет менее 1; значения находятся в диапазоне

$(1 - 10^{-5}) < \mu_r < (1 - 10^{-11})$

(например, Ag, Au, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn, вода, органические материалы, газ).

Парамагнитные материалы

μ_r не зависит от напряженности магнитного поля и составляет более 1; значения находятся в диапазоне

$(1 + 10^{-8}) < \mu_r < (1 + 10^{-4})$

(например, O2, Al, Pt, Ti).

Ферромагнитные материалы

У этих материалов магнитная поляризация достигает очень высоких значений и меняется в зависимости от напряженности магнитного поля H нелинейно; также эти материалы характеризуются гистерезисом намагничивания. Тем не менее, если выбирается, как это принято в электротехнике, соотношение $B = \mu_r \mu_0 H$, то μ_r является функцией H и имеющегося гистерезиса, значения для μ_r находятся в диапазоне $10^2 < \mu_r < 5 \cdot 10^5$

(например, Fe, Co, Ni, феррит).

Петля гистерезиса

Петля гистерезиса (рис. 11), показывающая зависимость между B и H, также как и между J и H, объясняется следующим образом: если материал находится в немагнитном состоянии ($B = J = 0$, $H = 0$), под действием магнитного поля H он намагничивается в соответствии с кривой (1). Когда при некоторой напряженности магнитного поля все магнитные диполи переориентируются, J достигает состояния поляризованности насыщения J_s (в зависимости от материала), которая не может больше повышаться. Если H уменьшается, J уменьшается в соответствии с кривой (2), которая уже не проходит через нулевую точку при $H = 0$, а пересекает ось B или J в точке остаточного магнетизма B_r или J_r (в этом случае $B_r = J_r$). Индукция и поляризованность падают до нуля при обратном направлении поля только при достижении напряженности магнитного поля значения H_{cB} или H_{cJ}. Эта напряженность поля называется коэрцитивной силой.

При дальнейшем повышении напряженности поля достигается насыщение поляризации в противоположном направлении. Если напряженность поля снова снижается и поле меняет направление, то симметрично отрезку кривой (2) проходит отрезок кривой (3).

Важнейшими параметрами петли гистерезиса являются:

- поляризованность насыщения J_S;
- остаточная магнитная индукция B_r (остаточная индукция для $H = 0$);
- коэрцитивная сила H_{cB} (размагничивающая напряженность поля при $B = 0$);
- коэрцитивная сила H_{cJ} (размагничивающая напряженность поля при $J = 0$, имеет значение только для магнитотвердых материалов);
- граничная напряженность поля H_G (до этой напряженности магнитотвердые материалы остаются стабильными);
- максимальная магнитная проницаемость μmax (максимальный подъем кривой первоначального намагничивания, имеет значение только для магнитомягких материалов);
- потери гистерезиса (потери энергии в материале в течение одного цикла перемагничивания, соответствуют площади петли гистерезиса B–H, имеет значение только для магнитомягких материалов).

Ферромагнитные материалы

Ферромагнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. Необходимо подчеркнуть, что воздействию коэрцитивной силы подвергаются каждые восемь из десяти таких материалов.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы имеют высокую коэрцитивную силу; ее значения находятся в области:

$$H_{cJ} > 1 \ \frac{\text{kA}}{\text{m}}$$

Вместе с этим может возникнуть большое размагничивающее поле H, из-за которого материал теряет свою магнитную поляризацию. Магнитное состояние и рабочая область постоянного магнита лежат во втором квадранте петли гистерезиса на кривой размагничивания. На практике рабочая точка постоянного магнита никогда не лежит в точке остаточного магнетизма, так как из-за саморазмагничивания магнит всегда используется в размагничивающем поле, которое сдвигает рабочую точку во второй квадрант.

Точка на кривой размагничивания, в которой произведение $B\,H$ достигает максимального значения $(B{\cdot}H)_{max}$, характеризует максимально достижимую энергию в воздушном зазоре. Эта величина, в дополнение к остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силе, имеет важное значение для характеристики постоянных магнитов. Важнейшими магнитотвердыми материалами для промышленного применения являются магниты, состоящие из AlNiCo, феррита, FeNdB (REFe) и SeCo; их кривые размагничивания (рис. 12) демонстрируют типичные характеристики для отдельных типов магнитов.

Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы имеют низкую коэрцитивную силу:

$$H_{cJ} < 1 \text{ кА/м}$$

и узкую петлю гистерезиса. Магнитная индукция принимает высокие значения (большие значения μ_r) уже при небольших величинах напряженности поля, так что обычно $J >> \mu_0$ H, то есть практически нет необходимости делать различие между кривыми $B(H)$ и $J(H)$.

Магнитомягкие материалы, из-за высокой индукции при низкой напряженности магнитного поля, применяются в качестве магнитопроводов. Так как эти материалы показывают низкие потери при перемагничивании (потери на гистерезис), они, имея низкую коэрцитивную силу, отлично подходят для применения в переменных магнитных полях.

Характеристики мягкомагнитных материалов существенно зависят от их предварительной обработки. Механическая обработка повышает коэрцитивную силу, а петля гистерезиса становится шире. Во избежание этого применяется специальный отжиг материала при высоких температурах (магнитный финальный отжиг). На рис. 13 представлены кривые намагничивания, выражающие зависимость $B–H$, для нескольких важных магнитомягких материалов.

Рис. 12. Кривые размагничивания для различных магнитотвердых материалов:
1 – AlNiCo 52/6, 2 – REFe 220/140, 3 – AlNiCo 60/11; 4 – SECo 112/100; 5 – AlNiCo 30/10, 6 – SECo 70/70p, 7 – PtCo 60/40; 8 – MnAl, 9 – магнитотвердый феррит 25/25



Потери на перемагничивание

В таблице 3 даны потери на перемагничивание P1 и P1,5 для индукции в 1 и 1,5 Тл при частоте 50 Гц и температуре 20 °С. Эти потери состоят из потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов. Потери от вихревых токов вызываются напряжением, которое индуцируется в сердечнике при изменении магнитного потока. Уменьшение потерь от вихревых токов и снижение электрической проводимости могут быть выполнены за счет применения:

- сердечника из листа;
- легированных материалов (например, ферросилиция);
- разделения на гранулированные частицы (порошок) в области высоких частот;
- керамических материалов (феррита).

Рис. 13. Кривые намагничивания для магнитомягких материалов:
1 – чистое железо; 2 – 78 NiFe (пермаллой); 3 – 36 NiFe, 4 – Ni-Zn феррит, 5 – 50 CoFe, 6 – V360-50A (электротехническая сталь); 7 – конструкционная сталь, 8 – чугун; 9 – порошковая сталь



Таблица 3. Потери на перемагничивание

Сорт листовой стали	Номинальная толщина, мм	Потери на перемагничивание		B (для H = 10 кА/м), Тл
		P1	P1,5	
М 270 – 35 А	0,35	1,1	2,7	1,70
М 330 – 35 А	0,35	1,3	3,3	1,70
М 400 – 50 А	0,5	1,7	4,0	1,71
М 530 – 50 А	0,5	2,3	5,3	1,74
М 800 – 50 А	0,5	3,6	8,1	1,77

Магнитное поле и электрический ток

Магнитное поле создается движущимся электрическим зарядом, то есть оно образуется вокруг проводника с электрическим током. Направление электрического тока (⊗ – ток течет в страницу, ⊙ – ток течет от страницы) и направление магнитной силовой линии подчиняются правилу буравчика правого винта. В таблице 4 приведены данные напряженности магнитного поля при различном расположении проводников.

В магнитном поле с индукцией B на провод длиной l с проходящим по нему электрическим током I действует сила F. Если провод и поле находятся под углом α друг к другу, сила равна:

$$F = BIl\sin\alpha .$$

Направление этой силы можно определить с помощью правила правой руки (рис. 14): если большой палец расположить по направлению силы тока, указательный палец – по направлению магнитного поля, то средний палец покажет направление силы.

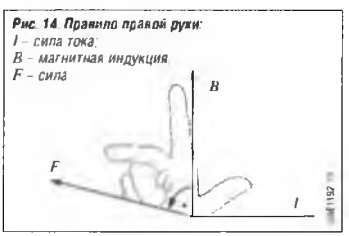


Рис. 14. Правило правой руки:
I – сила тока;
B – магнитная индукция
F – сила

Закон электромагнитной индукции

Любое изменение магнитного потока Φ, пересекающего петлевой проводник, например, при движении петли или при изменении силы поля, индуцирует в петлевом проводнике напряжение U_i. Также напряжение U_i индуциру-

Рис. 15. Проводники электрического тока и образуемые ими линии магнитного поля:
a – отдельный проводник с проходящим по нему током и магнитное поле;
b – параллельные проводники с проходящим по ним током одного направления (проводники притягиваются друг к другу);
c – параллельные проводники с проходящим по ним током противоположного направления (проводники отталкиваются друг от друга);
d – магнитное поле с индукцией B с силой воздействует на проводник с проходящим по нему током (направление силы определяется правилом правой руки)

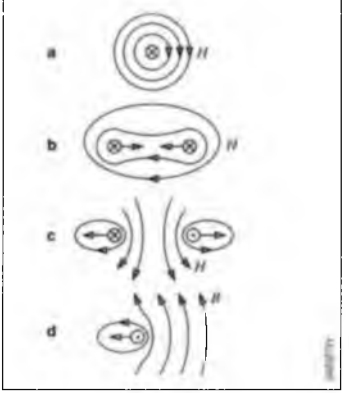


Таблица 4. Напряженность магнитного поля для различного расположения проводников

Соленоид, внутри	$H = \frac{I w}{l}$	w I l	число витков в обмотке сила тока, проходящего через обмотку, А длина обмотки, м
Прямой провод в воздухе, снаружи	$H = \frac{I}{2\pi r}$	r I	удаление от оси провода, м сила тока, А
Прямой провод, внутри	$H = \frac{I r}{2\pi a^2}$	r I	радиус провода, м сила тока, А
Кольцевой проводник, в центре кольца	$H = \frac{I}{2a}$	a I	радиус кривизны проводника, м сила тока, А

ется в проводнике, движущемся в магнитном поле в направлении v (рис. 16):

$$U_i = Bvl,$$

где
B – магнитная индукция;
l – длина проводника;
v – скорость.

Для двигателя постоянного тока:

$$U_i = 2\frac{lz\Phi}{dt},$$

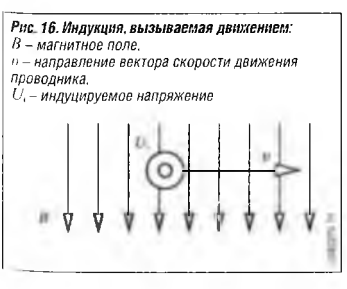
где
U_i – индуцируемое напряжение, В;
Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб;
z – число проводников на поверхности якоря;
a – половинное число параллельных ветвей обмотки;
частота $f = pn/60$;
p – число полюсов;
n – частота вращения, мин$^{-1}$.

Для двигателя переменного тока:

$$U_i = \frac{\pi f z \Phi}{\sqrt{2}}$$

где
U_i – эффективное значение индуцируемого напряжения, В;
Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб;
частота $f = pn/60$;
p – число полюсов;
n – частота вращения, мин$^{-1}$;
z – число проводников на поверхности якоря.

Рис. 16. Индукция, вызываемая движением:
B – магнитное поле,
v – направление вектора скорости движения проводника,
U_i – индуцируемое напряжение



Для трансформатора:

$$U_1 = 2\pi f w_1 \Phi,\ U_2 = 2\pi f w_2 \Phi,$$

где U_1, U_2 – эффективные значения индуцируемых напряжений, В;
Φ – эффективное значение магнитного потока $\Phi(t)$, Вб;
f – частота, Гц;
w_1, w_2 – число витков соответственных обмоток, пересекаемых магнитным потоком Φ.

В зависимости от времени поток $\Phi(t)$ представляет собой результат наложения значений силы тока $i_1(t)$ and $i_2(t)$:

$$\Phi(t) = A_L(w_1 i_1(t) + w_2 i_2(t)).$$

A_L называют AL-параметром – он зависит от конструкции трансформатора.

Выходное напряжение U на зажимах меньше (для генератора) и больше (для двигателя), чем U_i – за счет омических потерь напряжения в обмотках (примерно 5 %).

Самоиндукция

Магнитное поле проводника или обмотки меняется при изменении протекающего по ним электрического тока. За счет этого в проводнике индуцируется напряжение, пропорциональное изменению электрического тока:

$$U = \frac{d(L\,I)}{dt}$$

Индуктивность L зависит от магнитной проницаемости μ_r, которая для большинства материалов практически равна 1 и постоянна. Исключение составляют ферромагнетики. Поэтому для обмоток с ферромагнитным сердечником L в значительной степени зависит от условий работы. В таблице 5 приведены значения индуктивности L для проводников различного расположения.

При низких частотах индуктивность проводников увеличивается за счет внутренней индуктивности L_i проводов. Для круглых кабелей:

$$L_i = \frac{\mu_0 l}{8\pi}.$$

Двухжильные кабели, состоящие из двух круглых проводов, имеют двойное значение внутренней индуктивности ($2L_i$) на единицу длины l.

Таблица 5. Индуктивность для различного расположения проводников

Соленоид	$L = w^2 \frac{\mu_r \mu_0 q}{l}$	μ_r μ_0 w q l	относительная магнитная проницаемость магнитная постоянная число витков площадь поперечного сечения катушки, м² длина обмотки, м
Параллельные проводники (двухпроводная линия) в воздухе	$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - 4r^2}}{2r}$	l a r	длина линии, м расстояние между проводниками, м радиус проводника, м
Коаксиальная линия	$L = \frac{\mu_r \mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$	l r_2 r_1	длина линии, м внутренний радиус внешнего проводника радиус внутреннего проводника
Проводник над землей в воздухе	$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - r^2}}{r}$	l a r	длина линии, м расстояние от проводника до земли, м радиус проводника, м

Индуктивность катушек, соединенных последовательно и параллельно, равна:

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2$$

(последовательное соединение, рис. 17a);

$$\frac{1}{L_{\text{total}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

(параллельное соединение, рис. 17b).

Энергия магнитного поля для катушки с индуктивностью L, по которой проходит электрический ток I, равна:

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

Примеры (L постоянна во времени):

- постоянный электрический ток I:
  → напряжение $U = 0$;
- начальный электрический ток I_0, напряжение постоянного тока U:
  → сила тока $I = I_0 + U t$;
- синусоидальный электрический ток
  $I = \hat{\imath} \sin(\omega t)$:
  → косинусоидальное напряжение
  $U = \omega L \hat{\imath} \cos(\omega t)$,
  $U = \omega L \hat{\imath} \sin(\omega t + \pi/2)$,

где
$\omega = 2\pi f$ – угловая частота; $\hat{\imath}$ – амплитуда силы тока; $\hat{u} = \omega L \hat{\imath}$ – амплитуда напряжения.
Часто также используются эффективные значения $u_{\text{eff}} = \hat{u}/\sqrt{2}$ и $i_{\text{eff}} = \hat{\imath}/\sqrt{2}$.

При протекании через катушку индуктивности переменного (гармонического) электрического тока векторы напряжения и электрического тока сдвинуты на угол $\varphi = +\pi/2$. Это свойство иллюстрирует векторная диаграмма (рис. 18).

Особый случай возникает, когда катушка индуктивности подключается к сопротивлению, установленному со стороны источника напряжения постоянного тока U0, или отключается от сопротивления. Решающим фактором нарастания или падения электрического тока в цепи является постоянная времени $\tau = L/R$.

Рис. 17. Соединение катушек индуктивности:
a – последовательное соединение,
b – параллельное соединение

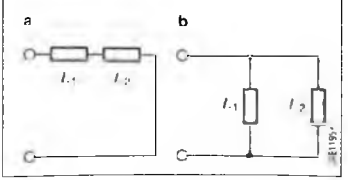
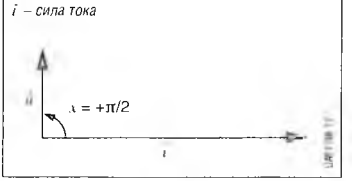


Рис. 18. Векторная диаграмма, катушка индуктивности:
û – напряжение,
î – сила тока



При подключении катушки (рис. 19):

$$U = U_0\, e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$I = \frac{U_0}{R}\,(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

При отключении катушки:

$$I = I_0\, e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U = I_0\, R\, e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где
U_0 – напряжение возбуждения;
I – сила тока, протекающего по катушке;
I_0 – сила тока, протекающего по катушке, при отключении;
R – сопротивление резистора, последовательно соединенного с катушкой;
U – напряжение на катушке.

Электрический ток при подключении и отключении катушки протекает по ней в противоположных направлениях.

Магнитная цепь

В дополнение к уравнениям существуют законы расчета магнитных цепей:

1. Закон Ампера (закон полного электрического тока)

Для магнитной цепи действует следующее равенство:

$$\sum H_i\, l_i = \sum V_i = I w,$$

где $I w = \Theta$ – магнитодвижущая сила (алгебраическая сумма ампер-витков);



Рис. 19. Подключение катушки индуктивности:
а – электрическая цепь;
b – кривые напряжения и силы тока

$H_i\, l_i = V_i$ – разность магнитных потенциалов ($H_i\, l_i$ служит для расчета компонентов цепи, при котором H_i является постоянной).

2. Закон непрерывности (принцип непрерывности магнитного потока)

Магнитный поток $\Phi = B\, A$ состоит из потоков на отдельных участках магнитной цепи.
Φ = const. для всех участков цепи, A – площадь поперечного сечения соответствующего участка.

Магнитный поток, проходящий через участок цепи, можно разбить на частные потоки Φ_1, Φ_2..., сумма которых в любом случае будет равна постоянному значению общего потока Φ.

Качество магнитных цепей определяется замыканием магнитного потока при его прохождении через рабочий воздушный зазор, имеющийся в цепи. Этот поток называется рабочим. Поток рассеяния, замыкаемый вне того места, где используется рабочий поток, представляет собой разность между общим и рабочим потоками. Отношение потока рассеяния к суммарному потоку (для постоянного магнита или электромагнита) называется коэффициентом рассеяния σ (практическая величина σ находится в диапазоне от 0,2 до 0,9).

Распространение волн

Волновод

Волноводы применяются для распространения электромагнитных волн. Для этой цели обычно служат двухпроводные и коаксиальные кабели, полосковые и микрополосковые линии передачи.

При высоких частотах переменный электрический ток, протекая по проводнику, распределяется не равномерно по сечению. С увеличением частоты он все более смещается к поверхностному слою (скин-эффект). В двухпроводных линиях происходит дополнительное смещение тока, протекающего по одному проводнику, в сторону другого проводника (эффект близости). В частности, увеличиваются омические потери и, таким образом, происходит затухание линии.

Линия передачи обладает внутренним сопротивлением, называемым волновым сопротивлением (характеристическим импедансом) Z. В линиях, используемых в автомобилях (ТЕМ-моды или L-линии) волновое сопротивление напрямую связано с емкостью C и индуктивностью L на единицу длины линии l:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

В таблице 6 приведены формулы для рассчета волнового сопротивления для некоторых типов линий передач.

Волновое сопротивление также определяется отношением амплитуд электрического и магнитного полей электромагнитных волн, распространяющихся по линии:

$$Z = \frac{\hat{E}}{\hat{H}}.$$

Линия с волновым сопротивлением Z, нагруженная сопротивлением R, имеет коэффициент отражения, определяемый по формуле:

$$r = \frac{R - Z}{R + Z}.$$

Произведение квадрата абсолютного значения коэффициента отражения и падающей мощности линии выражает отраженную долю мощности:

$$P_r = |r|^2 P_0$$

Если линия нагружена согласующим резистором, мощность равна:

$$P_t = (1 - |r|^2) P_0$$

В идеальном случае при $R = Z$ коэффициент отражения r равен нулю. В этом случае отраженная доля мощности отсутствует, таким образом, на согласующий резистор R будет передана полная мощность.

При высоких частотах и большой протяженности линий напряжение и электрический ток на линии больше не постоянны. За определенный момент времени обе эти величины меняются вдоль линии. В этом случае в одних местах по всей длине линии передачи будет устанавливаться максимум амплитуды колебаний напряжения, в то время как в других местах будет отмечено только минимальное напряжение. Соотношение максимальной и минимальной амплитуд на линии выражается коэффициентом стоячей волны s:

$$s = \frac{U_{max}}{U_{min}}.$$

Если на одном конце линии возбуждается волна с синусоидальной функцией времени, а на другом конце линия нагружена резистором, то коэффициент стоячей волны можно рассчитать по коэффициенту отражения:

Таблица 6. Волновое сопротивление для некоторых типов линий передач

Двухпроводная линия в воздухе	$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{\pi} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - 4r^2}}{2r}$	a r	расстояние между проводниками, м радиус проводника, м
Коаксиальная линия	$Z = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\varepsilon_r \varepsilon_0}} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$	r_2, r_1	внутренний радиус внешнего проводника радиус внутреннего проводника
Проводник над землей в воздухе	$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{2\pi} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - r^2}}{r}$	a r	расстояние от проводника до земли, м радиус проводника, м

$$s = \frac{1+|r|}{1-|r|}.$$

В идеальном случае $s = 1$ отраженная волна отсутствует и амплитуда напряжения во всех местах на линии остается неизменной.

Направленные ответвители и согласующие трансформаторы

Направленные ответвители используются в сочетании с согласующими трансформаторами, для того чтобы передавать электромагнитную волну от одного волновода к другому. Согласующие трансформаторы уменьшают коэффициент отражения при переходе от одного волнового сопротивления к другому или при переходе от пары симметричных волноводов (например, двухпроводной линии) к асимметричному одному (например, к коаксиальной линии).

Направленные ответвители и согласующие трансформаторы обычно взаимно согласованы, действуя как и в одном направлении, так и в обратном.

Распространение электромагнитных волн в свободном пространстве

Если волноводом является свободное пространство, то волновое сопротивление (характеристический импеданс, Z_0) равно:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377\,\text{Ом}.$$

При излучении электромагнитных волн в свободном пространстве при помощи антенны, напряженность электрического поля связана с напряженность магнитного поля через волновое сопротивление Z_0. Плотность потока энергии S электромагнитной волны, излучаемой передатчиком, определяется через амплитуды напряженности электрического поля $\hat{E}$ и напряженности магнитного поля $\hat{H}$. В свободном пространстве плотность потока энергии электромагнитной волны уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от передатчика:

$$S = \frac{1}{2}\hat{E}\hat{H};$$

$$S(r) = S(r_0)\frac{r_0^2}{r^2}.$$

С другой стороны, напряженности электрического и магнитного полей снижаются обратно пропорционально расстоянию от передатчика:

$$\hat{E}(r) = \hat{E}(r_0)\frac{r_0}{r};$$

$$\hat{H}(r) = \hat{H}(r_0)\frac{r_0}{r}.$$

В автомобилях приемник расположен так близко к передатчику, что образуется область ближнего поля. Радиопульты дистанционного управления, например, генерируют через токовые катушки магнитные поля, напряженность которых в области ближнего поля обратно пропорциональна кубу расстояния от передатчика.

Антенны

Направленный ответвитель от волновода, выходящий в свободное пространство, называется антенной. Антенны обычно являются взаимными устройствами, то есть, используются в качестве передающих и приемных антенн.

Электромагнитные волны в свободном пространстве состоят из переменных во времени электрического и магнитного полей. Векторы напряженности электрического и магнитного полей колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Направление соответствующего электрического поля определяет направление поляризации электромагнитной волны. В основном, антенны разработаны таким образом, что они могут передавать и принимать волну с ориентацией вектора электрического (иногда и магнитного) поля только в одном единственном направлении. То есть, антенны передают только линейно поляризованную волну и, соответственно, принимают волну только одной определенной поляризации.

Существует различие между узкополосными антеннами (вибраторными антеннами, используемыми, например, для сетей GPS, GSM, Bluetooth, WLAN или даже УКВ) и широкополосными антеннами, которые используются в транспортных средствах в качестве передающих и приемных антенн для измерений на электромагнитную совместимость (EMC). Примером антенны с узким диапазоном частот является полуволновой вибратор со стержнем или тросом длиной $l = 0{,}96\,\lambda/2$ (λ – длина волны в свободном пространстве). Оптимальная длина становится короче для более толстых стержней, или, в случае необходимости, также посредством соединения с дополнительными емкостями. В сочетании с расширенной поверхностью металла вибратора, длина одного $\lambda/4$-вибратора сокращается в два раза.

Примером широкополосной антенны является логопериодическая антенна. В ней используются несколько полуволновых вибраторов разной длины, подключенных к двухпроводной линии. Не существует антенны, которая работала бы в режиме передачи равномерно во всех направлениях. Кроме того, нет антенны, которая бы действовала в режиме приема во всех направлениях одинаково хорошо. Работу антенны в зависимости от направления характеризует диаграмма направленности (также ее называют характеристикой направленности антенны). На рис. 20 показана диаграмма направленности полуволнового вибратора, установленного в вертикальной секции вибраторной антенны. На диаграмме отложены значения плотности потока энергии при разных углах.

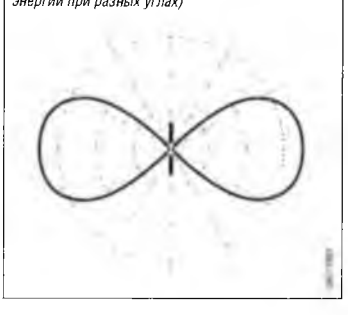
Часто интерес представляет не вся диаграмма направленности, но только изображенный на ней максимум, указывающий предпочтительное для данной антенны направление. Ориентирование антенны таким образом позволяет добиться максимальной плотности потока энергии излучения S_{max} на поверхности антенны в режиме передачи:

$$D_0 = \frac{S_{max}}{S_0}.$$

Коэффициент усиления антенны G приводится в децибелах:

$$G = 10 \log D_0.$$

Рис. 20. Диаграмма направленности полуволнового вибратора
(установлен в вертикальной секции вибраторной антенны, отложены значения плотности потока энергии при разных углах)



Потери усиления антенны, как правило, также связаны с коэффициентом усиления G, который становится меньше, чем в идеальном случае. Та же направленность и тот же коэффициент усиления антенны применимы и для режима приема. В этом случае эти параметры показывают, насколько меняется подводимая мощность антенны по сравнению с эталонной антенной. В стандартах EMC расчеты производятся не по коэффициенту усиления антенны, а с помощью антенного фактора AF.

$$AF = 20 \log \frac{E}{U}.$$

Антенный фактор указывает на то, что амплитуда напряжения U (в вольтах) падает при подключении к антенне входного сопротивления измерительного устройства, когда устанавливается электрическое поле с амплитудой E (В/м). Тот же антенный фактор применяется в режиме передачи при амплитуде напряжения U (в вольтах), когда на выходе передающей антенны имеется излучаемая волна, характеризуемая электрическим полем с амплитудой E (В/м).

Коэффициент усиления антенны и антенный фактор могут быть преобразованы один в другой:

$$AF = 10 \log \left| \frac{4\pi Z_0}{\lambda^2 R_L} \right| - G,$$

где R_L – входное сопротивление измерительного устройства и антенного входа (Ом, как правило, 50 Ом); Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства (равное 377 Ом); λ – длина волны (м).

Электрические эффекты в металлических проводниках

Контактная разность потенциалов между проводниками

Контактная разность потенциалов или электродвижущая сила (ЭДС) возникает у проводников аналогично тому, как контактная разность потенциалов или процесс электризации трением происходят у изоляторов (например, у стекла и жесткого каучука). Если между двумя разнородными металлами (при равной температуре) образовать плотное соединение «металл – металл», а потом их разъединить, между ними образуется контактная разность потенциалов. Причина связана с разной работой выхода электронов. Величина контактной разности потенциалов зависит от положения элементов в ряду контактных напряжений (табл. 7). Если соединяются более двух проводников, то результирующая контактная разность потенциалов равняется сумме отдельных значений контактной разности потенциалов.

Термоэлектричество

Разность потенциалов (гальваническое напряжение) образуется в месте контакта двух проводников из-за разного уровня работы выхода электронов. Сумма всех гальванических напряжений в замкнутой цепи проводников (с одинаковой температурой по всей цепи) равна нулю. Измерение этой разности потенциалов возможно только при изменении температуры (термоэлектрический эффект или эффект Зеебека). Значение термоэлектрического напряжения в большой мере зависит от степени загрязнения и предварительной обработки материала.

Таблица 7. Контактные напряжения

Пара материалов	Контактное напряжение, В
Zn/Pb	0,39
Pb/Sn	0,06
Sn/Fe	0,30
Fe/Cu	0,14
Cu/Ag	0,08
Ag/Pt	0,12
Pt/C	0,13
Zn/Pb/Sn/Fe	0,75
Zn/Fe	0,75
Zn/Pb/Sn/Fe/Cu/Ag	0,97
Zn/Ag	0,97
Sn/Cu	0,44
Fe/Ag	0,30
Ag/Au	–0,07
Au/Cu	–0,09

В ряду термоэлектрических констант (табл. 8) материалов дается их термо-ЭДС относительно эталонного металла (как правило, платины, меди или свинца). В нагретом месте соединения электрический ток течет от проводника с меньшей термо-ЭДС к проводнику с большей. Термо-ЭДС η любых пар (термоэлементов) равна разности индивидуальных термо-ЭДС.

Обратной стороной эффекта Зеебека является эффект Пельтье, при котором разность температур создается за счет электрической энергии (тепловой насос). При прохождении электрического тока через проводники, расставленные по порядку A–B–A, одно место спайки охлаждается, а другое нагревается больше, чем это соответствует выделяемой джоулевой теплоте. Производимое в этом случае количество теплоты определяется по формуле:

$$\Delta Q = \pi I \Delta t ,$$

Таблица 8. Ряд термоэлектрических констант (относительно платины)

Материал	Термический коэффициент, 10^{-6} В/К
Селен	1003
Теллур	500
Кремний	448
Германий	303
Сурьма	47–48,6
Нихром	22
Железо	18,7–18,9
Молибден	11,6–13,1
Церий	10,3
Кадмий	8,5–9,2
Сталь (V2A)	7,7
Медь	7,2–7,7
Серебро	6,7–7,9
Вольфрам	6,5–9,0
Индий	6,5–6,8
Родий	6,5
Цинк	7,0–7,9
Манганин	5,7–8,2
Золото	5,6–8,0
Олово	4,1–4,6
Свинец	4,0–4,4
Магний	4,0–4,3
Алюминий	3,7–4,1
Платина	0
Ртуть	–0,1
Натрий	–2,1
Калий	–9,4
Никель	–19,4 –12,0
Кобальт	–19,9 –15,2
Константан	–34,7 –30.4
Висмут I оси	–52
Висмут II оси	–77

где
π – коэффициент Пельтье; I – сила тока; Δt – временной интервал.

Коэффициент Пельтье π, температура T и термо-ЭДС η находятся в отношении:

$$\pi = \eta\, T\,.$$

Образование теплоты с помощью электрического тока возможно в однородном проводнике, если на нем поддерживается перепад температуры по длине $\Delta T/l$ (эффект Томсона). В то время как джоулева мощность пропорциональна I^2, мощность, производимая благодаря эффекту Томсона, равна:

$$P = -\sigma\, I\, \Delta T\,,$$

где
σ – коэффициент Томсона; I – сила тока; ΔT – разность температур.

Обратной стороной эффекта Томсона является эффект Бенедикса, при котором разность потенциалов создается за счет неравномерного распределения температур (особенно в тех местах, где значительно изменяется площадь поперечного сечения).

Гальваномагнитный и термомагнитный эффекты

Под такими эффектами понимают изменения электрической и термической проводимости проводника, вызванные воздействием магнитного поля. Существуют двенадцать эффектов этого рода, среди них самые известные – эффекты Холла, Эттингсхаузена, Риги-Ледук и Нерста.

Особое техническое значение имеет эффект Холла. Если по проводнику протекает электрический ток и проводник под прямым углом пронизывает магнитное поле, то возникает так называемое напряжение Холла U_H, перпендикулярное направлению тока и направлению магнитного поля (рис. 21):

$$U_H = R_H\, I_V\, B/d\,,$$

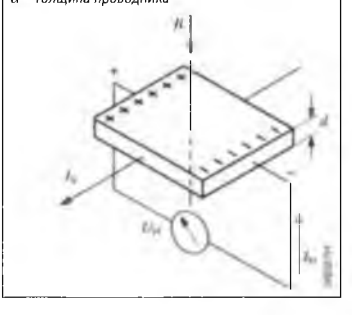
где
R_H – постоянная Холла; I_V – сила тока от источника питания; B – магнитная индукция; d – толщина проводника.

У ферромагнитных материалов напряжение Холла зависит от намагничивания (гистерезиса). Эффект Холла применяется в датчиках Холла.

Список литературы

[1] Philippow, E.: Grundlagen der Elektrotechnik. Verlag Technik Berlin, Munich, 10th Edition, 2000.
[2] Philippow, E.: Taschenbuch Elektrotechnik, Volume 1. Carl Hanser Verlag Munich, 3rd Edition, 1986.
[3] Albach, M.: Grundlagen der Elektrotechnik 1. Pearson Studium Munich, 2nd Edition, 2008.
[4] Albach, M.: Grundlagen der Elektrotechnik 2. Pearson Studium Munich, 1st Edition, 2005.

Рис. 21. Эффект Холла:
B – магнитная индукция;
I_H – сила тока Холла,
I_V – сила тока от источника питания,
U_H – напряжение Холла,
d – толщина проводника



Электроника

Базовые принципы полупроводниковой технологии

Электрическая проводимость твердых тел

Способность отдельных материалов проводить электрический ток определяется количеством и подвижностью имеющихся в них свободных носителей заряда. Так, различие в удельной электропроводимости для твердых тел при комнатной температуре проявляется в пределах диапазона, определяемого от 10-й до 24-й степени. Поэтому материалы соответствующим образом могут быть подразделены по электрическим свойствам на три электрических класса. В табл. 1 приведено их описание с примерами.

Проводники (металлы)

В твердых телах содержится приблизительно 10^{22} атомов на кубический сантиметр; вместе их удерживают электрические силы. В металлах имеется большое число свободных носителей заряда (один свободный электрон приходится на атом). Свободные носители зарядов обеспечивают металлам высокую электрическую проводимость; для хороших проводников она составляет примерно 10^6 См/см.

Диэлектрики (изоляторы)

Число свободных носителей заряда, обнаруживаемое в изоляторах, практически равно нулю. Соответственно, их электрическая проводимость незначительна; для хороших изоляторов она составляет примерно 10^{-18} См/см.

Полупроводники

Полупроводники по электрической проводимости занимают промежуточное положение между металлами и изоляторами. Это - в отличие от проводимости металлов и диэлектриков - в значительной степени зависит от следующих факторов:

- давление влияет на подвижность носителей заряда;
- температура влияет на количество и подвижность носителей заряда;
- воздействие света влияет на количество и подвижность носителей заряда;
- присутствие добавок также определяет, среди прочего, количество и тип носителей заряда.

Так как полупроводники зависят от указанных факторов, они пригодны для использования в качестве датчиков давления, температуры и света.

Легирование полупроводников

Легирование (дозированная добавка к основному материалу электрически активной примеси) в локальной области обеспечивает полупроводнику определенную величину проводимости; именно эта процедура лежит в основе современной технологии полупроводников. Производимая и также регулируемая электропроводность кремния, которая может быть воспроизведена легированием, равна от 10^{-2} до 10^4 См/см.

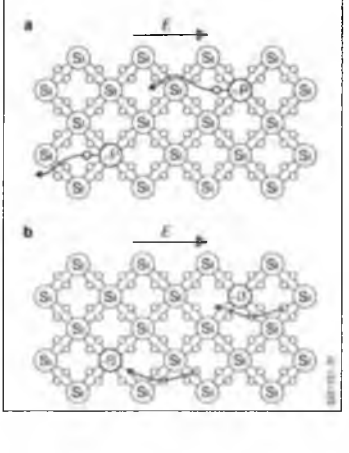
Электрическая проводимость полупроводников

Рассмотрим изменение этого параметра на примере кремния. В твердом состоянии кремний имеет кристаллическую решетку

Таблица 1. Классификация проводимости материалов

Проводники	Полупроводники	Изоляторы (диэлектрики)
Серебро	Германий	Тефлон
Медь	Кремний	Кварцевое стекло
Алюминий	Арсенид галлия	Оксид алюминия

Рис. 1. Легированный кремний
a – n-легированный кремний; b – p-легированный кремний; e - электрон; Si – кремний; P – фосфор; B – бор; E – электрическое поле
Криволинейные стрелки показывают направление движения электронов



с четырьмя равноудаленными смежными атомами. Каждый атом кремния имеет четыре валентных электрона с двумя парными электронами, формирующими валентную связь между каждой парой атомов кремния. В таком идеальном состоянии кремний не имеет свободных носителей заряда и не является проводимым. Условия резко изменяются при добавлении соответствующей присадки и подводе энергии.

Здесь мы поясним легирование на простой и очевидной модели. Тем не менее, важно помнить, что далеко не все эффекты можно объяснить при помощи этой модели.

n-легирование

Введение примесных атомов с пятью валентными электронами (например, фосфора) обеспечивает появление в кристаллической решетке кремния (см. рис. 1, а) 4 свободных электронов. Таким образом, каждый дополнительный атом фосфора будет предоставлять свободный, отрицательно заряженный электрон, и при этом остается одно положительно заряженное ядро фосфора. Кремний превращается в n-проводник (кремний n-типа), так как возникает избыток отрицательного заряда (электроны). В ответ на внешнее приложенное напряжение создается электрическое поле E, см. рис. 1, которое придает подвижным носителям заряда выделенное направление для движения.

p-легирование

Введение примесных атомов с тремя валентными электронами (например, бор) обеспечивает появление дырок, так как атом бора имеет на один электрон меньше, чем в кристаллической решетке кремния (рис. 1, в). Дырка означает нехватку электрона. Дырки перемещаются внутри кремния; в электрическом поле они перемещаются в направлении, противоположном направлению движения электронов. Дырки являются носителями свободного положительного заряда. Таким образом, каждый дополнительный атом бора предоставляет свободную положительно заряженную дырку (положительная дырка). Кремний превращается в p-проводник и называется кремнием p-типа.

Собственная электропроводность

Под действием температуры и света в необработанном кремнии могут образоваться свободные носители заряда, представляющие собой связанные электронно-дырочные пары (экситоны), которые обеспечивают материалу собственную проводимость. Она является объединением проводимостей p- и n-типа, получаемых легированием. Повышение температуры ведет к экспоненциальному росту числа электронно-дырочных пар, в конечном счете устраняющему электрических потенциалов между p- и n-областями, созданными легированием. Это явление налагает ограничение температуры, которым могут подвергаться полупроводниковые компоненты. Для германия – это 90–100 °C, для кремния – 150–200 °C, а для арсенида галлия – 300–350 °C.

В полупроводниках как n-, так и p-типа всегда имеется небольшое количество носителей заряда противоположной полярности. Их наличие сказывается на рабочих характеристиках практически всех полупроводниковых приборов.

p-n-переход

Пограничный слой между p и n-областью в пределах одного и того же кристалла полупроводника называется p-n-переходом. Его свойства определяют рабочие характеристики большинства полупроводников.

p-n-переход без внешнего электрического напряжения

p-область характеризуется наличием большого количества дырок, в то время как n-область имеет их очень немного; в n-области присутствует большое количество электронов, в то время как в p-области их исключительно мало. Каждый тип подвижного носителя заряда стремится двигаться в противоположную зону (диффузионные токи) (рис. 2, в).

Диффузия дырок в n-область приводит к тому, что p-область становится отрицательно заряженной в области пространственного заряда, так как отрицательно заряженные атомные радикалы (например, бора) остаются неподвижными. Недостаток электронов приводит к тому, что n-область становится положительно заряженной, так как в ней образуется избыток неподвижных положительно заряженных атомных радикалов (например, фосфора). Возникает разность потенциалов между p- и n-областями (потенциал поля p-n-перехода U_D), противодействующая миграции носителей заряда и в конечном счете приводящая к полному прекращению обмена дырок и электронов. Потенциал U_D создан

за счет диффузии, и его невозможно непосредственно измерить извне, для кремния он обычно составляет всего лишь 0,6 В.

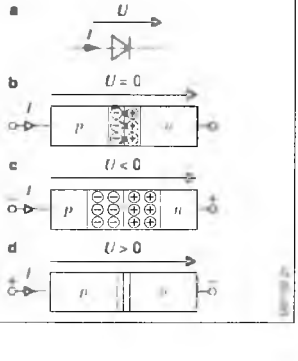
В p-n-переходе образуется область с недостаточным количеством подвижных носителей заряда: эта зона называется областью пространственного заряда или запирающим слоем. Она имеет электрическое поле, напряженность которого также зависит от внешнего приложенного напряжения.

p-n-переход с внешним электрическим напряжением

Теперь можно описывать условия работы диода, так как p-n-переход соответствует структуре диода; анод находится в p-легированном кремнии, а катод - в n-легированном кремнии.

При подаче напряжения U в обратном направлении (отрицательный полюс – в p-области, а положительный – в n-области) область пространственного заряда расширяется (рис. 2, c). В этих условиях электрический ток I прерывается, за исключением минимального остаточного тока (обратный ток), поддерживаемого незначительным количеством носителей заряда. Напряжение U затем падает в области пространственного заряда; соответственно, эта область становится зоной высокой напряженности электрического поля.

Рис. 2: p-n-переход в диоде:
a – символ диода; b – p-n-переход при отсутствии внешнего напряжения, c – p-n-переход под действием обратного напряжения; b – p-n-переход под действием прямого напряжения; U – приложенное напряжение (напряжение на диоде); I – ток диода;
⊕ – положительно заряженные атомные остатки;
⊖ – отрицательно заряженные атомные остатки



Напряжение туннельного пробоя p-n-перехода – это напряжение обратной полярности и такой величины, когда минимальное его увеличение становится достаточным для резкого возрастания обратного тока (рис. 3). Этот эффект объясняется следующим. Электроны, достигающие области пространственного заряда, значительно ускоряются за счет высокой напряженности поля. Таким образом, они могут, в свою очередь, генерировать свободные носители заряда в результате такого воздействия; этот эффект также известен как ударная ионизация. Это приводит к резкому возрастанию тока и вызывает лавинный пробой. Дополнительно к лавинному пробою на основе туннельного эффекта возникает также зенеровский пробой. Пробой может привести к нарушению p-n-перехода и поэтому иногда нежелателен. Тем не менее, во многих случаях пробой бывает полезен. Лавинный и зенеровский пробои возникают только в том случае, когда диод работает в обратном направлении.

При подаче напряжения U в прямом направлении (положительный полюс в p-области, а отрицательный – в n-области) область пространственного заряда уменьшается (рис 2, d). Носители заряда проникают в p-n-переход под действием большого тока в прямом направлении (рис. 3), так как область пространственного заряда больше не имеет значительного сопротивления. Эффективно только объемное сопротивление, то есть активное сопротивление легированных слоев. Ток I возрастает экспоненциально как функция U. Однако, следует помнить о «тепловом пробое», так как при этом полупроводник может полностью выйти из строя из-за перегрева. Это может произойти, например, если диод работает в прямом направлении при недопустимо высоком токе.

Рис. 3: Вольтамперная характеристика кремниевого диода:
U – приложенное напряжение (напряжение на диоде), I – ток диода



Дискретные полупроводниковые приборы

Использование одного или нескольких p-n-переходов в одном кристалле полупроводника позволяет создавать недорогие, надежные, компактные полупроводниковые приборы. Один p-n-переход образует диод, два p-n-перехода используются в транзисторах. Планарная технология позволяет сочетать в одном кристалле различные элементы и формировать интегральные полупроводниковые микросхемы. Полупроводниковые микросхемы занимают от одного до сотен квадратных миллиметров и обычно устанавливаются в стандартные оболочки (металлические, керамические, пластиковые).

Диоды

Диод – полупроводниковое устройство, содержащее один p-n-переход. Свойства единичного диода определяются схемой распределения легирующей примеси в кристалле. Диоды, способные пропускать в прямом направлении ток более 1 А, считаются силовыми.

Выпрямительный диод

Выпрямительный диод действует как одноименная электронная лампа – пропускает ток в одном направлении, т.е. идеально подходит для выпрямления переменного тока. Обратный ток бывает приблизительно в 10^7 раз меньше, чем ток в прямом направлении (рис. 3). Он сравнительно быстро возрастает при повышении температуры.

Выпрямительный диод для высокого обратного напряжения

Напряжение в выпрямителях с высоким обратным напряжением падает в области пространственного заряда. Так как эта область, как правило, размером всего несколько микрон, для нее характерна высокая напряженность электрического поля, при которой свободные электроны могут значительно ускоряться. Ускоренные электроны могут привести к разрушению полупроводника (лавинный пробой). Чтобы избежать этого, между p- и n-слоями размещают слой с собственной проводимостью, так как этот слой содержит некоторое количество свободных электронов, что снижает опасность пробоя.

Переключательный диод

Эти устройства обычно используются для быстрого переключения между высоким и низким полными сопротивлениями. Более быстрая характеристика переключения может достигаться путем диффузии золота в материал (обеспечивает электронно-дырочную рекомбинацию).

Диод Зенера

В диоде Зенера при достижении некоторого начального уровня обратного напряжения происходит резкое возрастание электрического тока. Это явление соответствует пробою Зенера (туннельный пробой p-n-перехода) и/или лавинному пробою. Диоды Зенера предназначены для непрерывной работы в режиме пробоя. Они часто используются для обеспечения постоянного или опорного напряжения.

Варикап

Область пространственного заряда в p-n-переходе функционирует как конденсатор; диэлектрик конденсатора представляет собой полупроводниковый материал, в котором отсутствуют носители заряда. Повышение напряжения расширяет обедненный слой и уменьшает емкость, а уменьшение напряжения ее повышает.

Диод Шотки

Имеет переход типа металл-полупроводник (барьер Шотки). Поскольку электроны более свободно перемещаются из кремния n-типа в металлический слой, а не наоборот, область, обедненная электронами, становится полупроводниковым материалом - это и есть «барьер Шотки». Заряды переносятся исключительно электронами, при этом незначительное число переносчиков не позволяет заряду накапливаться, результатом чего является очень быстрое переключение. Прямое напряжение и, следовательно, падение напряжения в диодах Шотки примерно на 0,3 В меньше, чем в кремниевых диодах (примерно 0,6 В).

Солнечный элемент

Фотогальванический эффект используется для преобразования световой энергии непосредственно в электрическую. Солнечные элементы, состоящие, главным образом, из полупроводниковых материалов, в которых на свету образуются свободные носители заряда, – основные элементы фотогальванической технологии. Воздействие света может привести к образованию свободных носителей заряда (электронно-дырочной пары) в полупроводнике. Если полупроводник содержит p-n-переход, свободные носители заряда разделяются в его электрическом поле перед тем,

как воздействовать на металлические контакты на поверхности полупроводника. Постоянное напряжение (напряжение фотосигнала) возникает между контактами; в зависимости от используемого материала полупроводника электрический потенциал изменяется в интервале от 0,5 до 1,2 В. Это происходит только тогда, когда кванты света обладают, по крайней мере, энергией, необходимой для создания электронно-дырочной пары. Теоретический к.п.д. кристаллических кремниевых солнечных элементов составляет около 30%.

Фотодиод

В фотодиоде используется фотогальванический эффект. *p-n*-переход работает в обратном направлении. Падающий свет создает дополнительные электроны и дырки. Это приводит к пропорциональному росту обратного (фотогальванического) тока в зависимости от интенсивности света. Таким образом, фотодиод, в принципе, очень похож на солнечный элемент.

Светодиод (LED)

Светоизлучающий диод, или светодиод представляет собой электролюминесцентный источник света, состоящий из полупроводникового элемента с *p-n*-переходом. Во время работы носители заряда (электроны и дырки) рекомбинируют в прямом направлении. Высвобождаемая в ходе этого процесса энергия преобразуется в энергию электромагнитного излучения.

В зависимости от выбора полупроводника и его легирования светодиод излучает в ограниченном спектральном диапазоне. Как правило, используются арсенид галлия (инфракрасный спектр), арсенидфосфид галлия (от красного к желтому) и фосфид галлия (зеленый) и нитрид индия-галлия (синий). Для генерирования белого света используется либо комбинация трех светодиодов основных цветов (красный, зеленый, синий), либо осуществляется возбуждение люминесцентной краски при помощи светодиода, излучающего синий свет или свет в ультрафиолетовом диапазоне.

Биполярные транзисторы

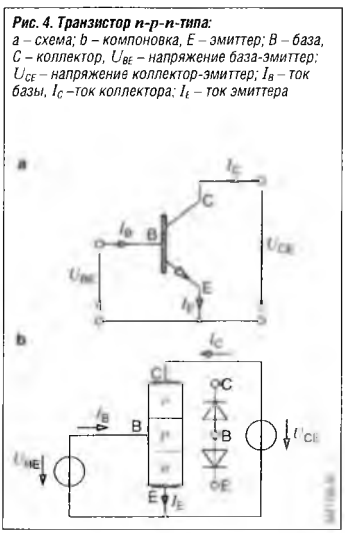
Два смежных *p-n*-перехода создают транзисторный эффект, который используется в компонентах, предназначенных для усиления и переключения электрических сигналов. Имеются три различных зоны проводимости, при этом могут использоваться схемы как *p-n-p*, так и *n-p-n*. Зоны (и их выводы) называются эмиттером (E), базой (B) и коллектором (C) (рис. 4).

В зависимости от области применения транзисторы разделяются на различные классы: транзисторы малой мощности (рассеиваемая мощность до 1 Вт); силовые транзисторы, коммутирующие транзисторы; высокочастотные транзисторы; СВЧ-транзисторы; фототранзисторы. Они называются биполярными, потому что в транзисторном эффекте принимают участие носители заряда обеих полярностей (дырки и электроны).

Работа биполярного транзистора

Работа биполярного транзистора поясняется на примере транзистора *n-p-n*-типа (рис. 5). Транзистор *p-n-p*-типа получается аналогично, путем переключения *n*- и *p*-легированных зон

Рис. 4. Транзистор n-p-n-типа:
a – схема; b – компоновка, E – эмиттер; B – база, C – коллектор, U_{BE} – напряжение база-эмиттер; U_{CE} – напряжение коллектор-эмиттер; I_B – ток базы, I_C –ток коллектора; I_E – ток эмиттера



Эмиттерный переход (ЕВ) – прямо включенный, показан на рис. 4, в, как диод, включенный между базой В и эмиттером Е. При достаточно высоком напряжении U_{BE} электроны инжектируются в область базы, и через транзистор протекает ток базы.

Коллекторный переход – обратно включенный, показан на рис. 4, в, как диод, включенный между базой В и коллектором С. Это создает область пространственного заряда в районе p-n-перехода между базой и коллектором с высокой напряженностью электрического поля.

Благодаря включенному в обратном направлении диоду между базой и эмиттером, из эмиттера в базу течет большой ток, состоящий из электронов. Однако только небольшая часть электронов может рекомбинировать со значительно меньшим количеством дырок и утекать через вывод базы, как ток базы I_B. Следует иметь в виду, на рис. 4 показано техническое направление тока, т.е. направление движения носителей положительного заряда. Значительно большее количество электронов, инжектированных в базу, диффундирует через зону базы в переход база-коллектор и затем проходит к коллектору, как ток коллектора I_C (рис. 5). Поскольку диод «база-коллектор» включен в обратном направлении, и преобладает область пространственного заряда, практически все (приблизительно 99 %) электроны, вытекающие из эмиттера, «вытягиваются» сильным электрическим полем, имеющим место в области пространственного заряда из коллектора. При этом имеет место приблизительно линейная зависимость между током коллектора I_C и током базы I_B:

$$I_C = B\, I_B,$$

где значение B (коэффициент усиления по току) составляет обычно от 100 до 800. В биполярном транзисторе имеет место также следующее соотношение для тока эмиттера I_E (см. рис. 4 и 5):

$$I_E = I_B + I_C.$$

В связи с тем, что I_B за счет коэффициента усиления по току B значительно меньше, чем I_C:

$$I_E \approx I_C.$$

Очень тонкий (и относительно низколегированный) слой базы представляет собой барьер, проводимость которого может регулироваться посредством изменения напряжения база-эмиттер U_{BE}. Путем небольших изменений U_{BE} и тока базы I_B можно управлять значительными изменениями тока коллектора I_C и напряжения коллектор-эмиттер U_{CE}. Таким образом, малые изменения I_B вызывают значительные изменения тока коллектора I_C. Транзистор n-p-n-типа является биполярным, управляемым током полупроводниковым усилителем. В целом имеет место усиление мощности.

Выходные характеристики транзистора n-p-n-типа показаны на рис. 6. Начиная с напряжения насыщения U_{CE}, равного приблизительно 0,2 В, ток коллектора I_C зависит практически только от тока базы I_B; эта область имеет название «активной зоны»: здесь U_{CE} практически не оказывает влияние на I_C, и имеет место следующее соотношение:

Рис. 5. Принцип действия транзистора n-p-n-типа: *Е – эмиттер, В – база; С – коллектор; U_{BE} – напряжение база-эмиттер; U_{CE} – напряжение коллектор-эмиттер, I_B – ток базы, I_C – ток коллектора; I_1 – ток эмиттера*

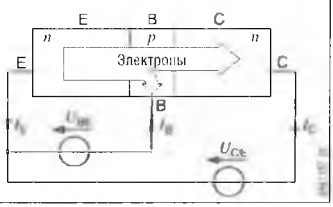


Рис. 6. Выходные характеристики транзистора n-p-n-типа: *U_{CE} – напряжение коллектор-эмиттер, I_C – ток коллектора; I_B – ток базы, как параметр характеристической кривой*



$I_C = B\,I_B$.

Область, которой напряжение коллектор-эмиттер ниже напряжения насыщения, называется «зоной насыщения». В этой зоне I_C резко возрастает с увеличением U_{CE}.

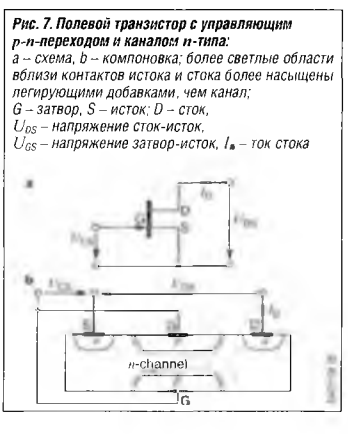
Полевые транзисторы

Управление током в полевых транзисторах (FET) осуществляется электрическим полем, которое генерируется напряжением, прикладываемым к управляющему электроду (рис. 7). В полевых транзисторах используется только один тип носителей заряда (электронов или дырок), поэтому их называют также «униполярными». Существуют следующие виды полевых транзисторов:полевой транзистор с управляющим p-n-переходом (FET, JFET) и полевые транзисторы с изолированным затвором, в частности полевые MOS-транзисторы (на основе структуры металл-оксид-полупроводник).

Полевые MOS-транзисторы хорошо подходят для применения в интегральных схемах с высокой степенью интеграции. Полевые транзисторы большой мощности во многих случаях представляют серьезную альтернативу биполярным транзисторам.

Преимущества биполярных и полевых транзисторов используются в силовых электронных элементах, известных под названием «биполярные транзисторы с изолированным затвором» (IGBT), которые демонстрируют низкое сопротивление (малые потери мощности) и сравнительно низкую мощность, требуемую для управления.

Рис. 7. Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа:
a – схема, b – компоновка; более светлые области вблизи контактов истока и стока более насыщены легирующими добавками, чем канал;
G – затвор, S – исток; D – сток,
U_{DS} – напряжение сток-исток,
U_{GS} – напряжение затвор-исток, I_D – ток стока



Работа обедненного слоя (управляющего p-n-перехода) полевого транзистора с управляющим p-n переходом

Работа полевого транзистора с управляющим p-n-переходом поясняется на примере транзистора с каналом n-типа (рис. 7). Выводы полевого транзистора имеют названия затвор (G), исток (S) и сток (D).

Положительное прямое напряжение U_{DS} приложено к концам кристалла n-типа. При этом электроны движутся от истока (S) к стоку (D) по каналу, ширина которого определяется двумя поперечно-диффундирующими областями p-типа и отрицательным напряжением затвор-исток U_{GS}. Таким образом, напряжение U_{GS} между затвором (G) и истоком (S) управляет величиной тока I_D между истоком и стоком (D).

Для работы полевого транзистора требуются носители заряда только одной полярности, а мощность, необходимая для управления током, фактически равна нулю. Таким образом, полевой транзистор с управляющим p-n-переходом представляет собой униполярный, управляемый напряжением компонент. Увеличение U_{GS} вызывает расширение областей пространственного заряда и их внедрение в каналы, что приводит к сужению канала и, следовательно, к ограничению пути тока (показано на рис. 7 пунктирными линиями). Если напряжение U_{GS} на затворе равно нулю, сечение канала между двумя зонами p-типа не ограничено, и ток I_D стока D к истоку S имеет максимальное значение.

Кривая переходной характеристики, т.е. I_D в функции U_{GS} выглядит точно так же, как характеристическая кривая самопроводящего полевого транзистора с каналом n-типа (NMOS), как показано на рис. 9, с.

Работа MOS-транзистора

Работа MOS-транзистора (металл-оксид-полупроводник) поясняется на примере самоблокирующегося (обогащенного типа) канала n-типа MOSFET (рис. 8). Если к электроду затвора никакого напряжения не прикладывается, между истоковой и стоковой областями ток протекать не будет: p-n-переход остается закрытым. Подача положительного напряжения на затвор вызывает, за счет электростатической индукции, в зоне p-типа под этим затвором, смещение дырок

внутрь кристалла, а электронов, которые всегда присутствуют в кремнии p-типа, как вторичные носители заряда, притягиваются к поверхности. Под поверхностью кристалла формируется узкий слой (канал) n-типа. Теперь электрический ток может проходить между двумя n-областями (исток и сток). Он обеспечивается исключительно электронной проводимостью. Поскольку напряжение затвора подается на изолирующий оксидный слой, то в управляющей цепи ток отсутствует, и мощности на выполнение управляющих функций не требуется. Для перезарядки емкости затвора требуется только активировать и деактивировать напряжение. В целом MOS-транзистор представляет собой униполярный, управляемый напряжением элемент. В случае самопроводящего канала n-типа MOS-транзистора (обедненного типа, см. рис. 9, a), напряжение затвор-исток U_{GS} находится в диапазоне от отрицательного порогового напряжения U_T до нуля вольт (рис. 9, c). При $U_{GS} = 0$ В самопроводящий канал n-типа MOS-транзистора имеет канал, проходящий ниже затворов, позволяющий протекать току. На рис. 9, c показана зависимость I_D от U_{GS}, где цепь находится в активной зоне с достаточным и постоянным напряжением U_{DS}. Переходная характеристика представляет собой параболу. В отличие от MOS-транзистора с самопроводящим каналом самоблокирующийся канал MOS-транзистора n-типа (см. рис. 9, b) проводит только при $U_T > 0$ В (см. рис. 9, c). Самоблокирующиеся полевые MOS-транзисторы получили значительно большее распространение, чем самопроводящие MOS-транзисторы.

Выходная характеристика самоблокирующегося полевого MOS-транзистора с каналом n-типа представлена на рис. 10. Область, лежащая ниже кривой напряжения насыщения U_K, т.е. область, в которой $U_{DS} < U_K$ в связи с линейным характером характеристической кривой, называется линейной или омической областью; Здесь полевой MOS-транзистор ведет себя подобно омическому сопротивлению. В области, лежащей выше кривой напряжения насыщения U_K, т.е. в области, в которой $U_{DS} > U_K$, выходной ток I_D практически не зависит от напряжения исток-сток U_{DS}, эта область известна под названием области отсечки. Величина I_D зависит

Рис. 8. Сечение полевого MOS-транзистора с каналом n-типа:
S – исток; G – затвор, D – сток, U_{DS} – напряжение сток-исток, U_{GS} – напряжение затвор-исток; I_D – ток стока

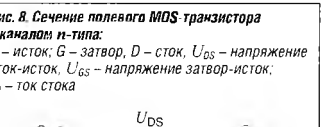


Рис. 9. Полевой MOS-транзистор с каналом n-типа:
a – схема самопроводящего канала n-типа полевого MOS-транзистора;
b – схема самоблокирующегося канала n-типа полевого MOS-транзистора,
c – характеристические кривые;
1 – характеристическая кривая самопроводящего канала n-типа полевого MOS-транзистора,
2 – характеристическая кривая самоблокирующегося канала n-типа полевого MOS-транзистора;
U_{GS} – напряжение затвор-исток, I_D – ток стока, U_T, U_T' – пороговое напряжение

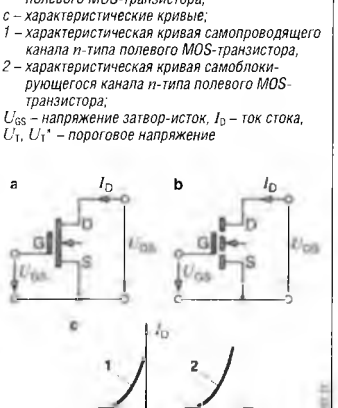
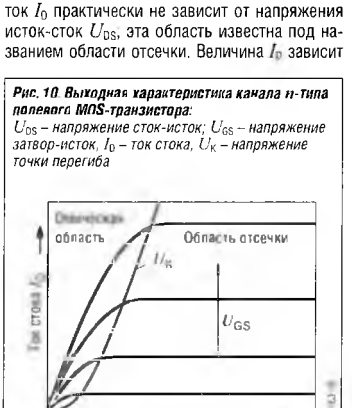


Рис. 10. Выходная характеристика канала n-типа полевого MOS-транзистора:
U_{DS} – напряжение сток-исток; U_{GS} – напряжение затвор-исток, I_D – ток стока, U_K – напряжение точки перегиба



только от напряжения затвор-исток U_{GS}. Рассчитывается по формуле:

$$I_D = 0{,}5\ K\ (U_{GS} - U_T)^2,$$

где K – коэффициент пропорциональности (среди прочего зависящий от технологии изготовления), U_T – пороговое напряжение, начиная с которого транзистор начинает проводить ток, т.е. при котором образуется канал (см. рис. 9, с).

p-канальные MOS-транзисторы, n-канальные MOS-транзисторы и CMOS-транзисторы

Так же как для n-канальных MOS-транзисторов, смешанное легирование дает p-канальный MOS-транзистор. Так как электроны в n-канальном MOS-транзисторе более подвижны, он работает быстрее по сравнению с p-канальным MOS-транзистором.

Также применяется технология, основанная на соединенных попарно p-канальных и n-канальных MOS-транзисторах в одном кремниевом кристалле. Такие устройства называются комплементарными MOS-транзисторами (CMOS-транзисторами, см. рис. 11). Особенными преимуществами CMOS-транзисторов можно назвать крайне низкое рассеивание энергии, высокую степень устойчивости к помехам, относительную нечувствительность к изменению напряжения питания.

Гибридная технология BCD

Все более важную роль начинают играть интегрированные структуры для силовой электроники. Такие структуры реализуются путем объединения биполярных и MOS-компонентов в одном кремниевом чипе, что позволяет использовать преимущества обеих технологий. Гибридная технология BCD, используемая для получения силовых MOS-компонентов (DMOS-структуры), играет важную роль в автомобильной электронике. Эта технология представляет собой комбинацию CMOS и DMOS-технологий.

Рис. 11. CMOS-инвертор на основе p-MOS и n-MOS структур



Операционные усилители

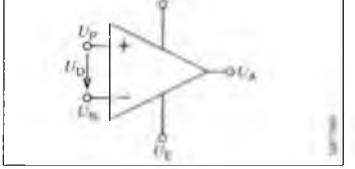
Области применения операционных усилителей

Название «операционный усилитель» (OPA), происходящее из области аналоговой вычислительной техники, обозначает (почти) идеальный усилитель. Благодаря своим свойствам операционные усилители в основном применялись в аналоговых компьютерах для решения нелинейных дифференциальных уравнений в качестве сумматоров, интеграторов и дифференциаторов. В дальнейшем быстрое развитие цифровой электроники привело к тому, что аналоговые компьютеры были полностью вытеснены с рынка.

Интеграция различных электронных компонентов в едином корпусе позволяет производителям предложить на рынке такие операционные усилители по очень привлекательной цене. Для достижения требуемых характеристик операционные усилители в интегральной форме, в зависимости от требований, содержат от 10 до 259 транзисторов, количество которых, однако, играет второстепенную роль в отношении степени интеграции.

В этом разделе приведено описание поведения и использования идеального операционного усилителя, начиная с «нормального» операционного усилителя с входами напряжения и выходом напряжения (операционный усилитель VV-типа). Затем будут более

Рис. 12. Базовая схема операционного усилителя: *+ – неинвертирующий вход, – – инвертирующий вход; U_D – дифференциальное напряжение между двумя входными потенциалами U_P и U_N, где $U_D = U_P - U_N$, U_A – выходное напряжение, U_{CC} – положительное напряжение питания, U_E – отрицательное напряжение питания Все напряжения измеряются относительно массы*



детально исследованы свойства реального операционного усилителя.

Основные принципы

Идеальный стандартный операционный усилитель представляет собой усилитель, двумя входами и (обычно) одним выходом (рис. 12). Усилитель имеет инвертирующий и неинвертирующий входы. Усилитель осуществляет усиление дифференциального напряжения U_D. Выходное напряжение U_A определяется по следующей формуле:

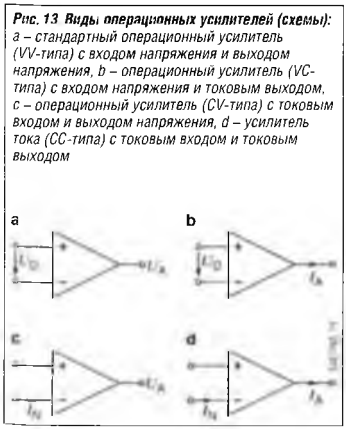
$$U_A = A_D U_D,$$

где A_D - коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи. Операционный усилитель подключается к источникам положительного и отрицательного напряжений питания относительно общего вывода. В случае однополярного питания общий вывод соединяется с отрицательным выводом источника питания. Напряжения питания обычно на схемах не показываются, однако, разумеется, они необходимы для нормальной работы усилителя.

Существуют следующие варианты операционных усилителей (см. рис. 13):

- «нормальный» операционный усилитель (операционный усилитель VV-типа) с входами напряжения и выходом напряжения;
- усилитель тока, управляемый напряжением (операционный усилитель VC-типа) с входом напряжения и токовым выходом;
- усилитель напряжения, управляемый током (операционный усилитель CV-типа) с токовым входом и выходом напряжения;
- усилитель тока (операционный усилитель CC-типа) с токовым входом и токовым выходом.

Рис. 13. Виды операционных усилителей (схемы): *a – стандартный операционный усилитель (VV-типа) с входом напряжения и выходом напряжения, b – операционный усилитель (VC-типа) с входом напряжения и токовым выходом, c – операционный усилитель (CV-типа) с токовым входом и выходом напряжения, d – усилитель тока (CC-типа) с токовым входом и токовым выходом*



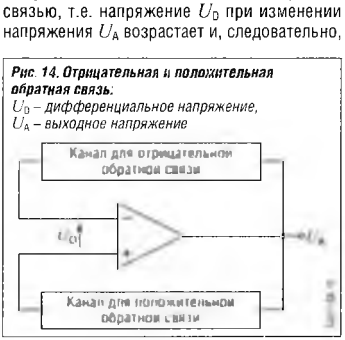
Как правило, используются операционные усилители VV-типа; детальные пояснения приведены ниже. Поскольку функции операционного усилителя определяются схемой его включения, прежде всего, детально рассмотрим возможные схемы. Здесь важным является различие между положительной и отрицательной обратной связью. При выводе соотношений предполагается, что мы имеем дело с идеальным операционным усилителем.

Компоновка схемы: отрицательная и положительная обратная связь

Отрицательная обратная связь вызывает противодействие изменению выходной переменной. В операционном усилителе с этой целью выход усилителя соединяется с инвертирующим входом (см. рис. 14). Это соединение может быть реализовано при помощи канала обратной связи. Причина изменения выходного напряжения U_A всегда заключается в изменении дифференциального входного напряжения U_D; следовательно, отрицательная обратная связь всегда действует таким образом, что напряжение U_D уменьшается и в идеальном случае становится равным нулю.

В отличие от отрицательной обратной связи положительная обратная связь способствует изменению выходного напряжения. Таким образом, выходное напряжение U_A усиливается положительной обратной связью, т.е. напряжение U_D при изменении напряжения U_A возрастает и, следовательно,

Рис. 14. Отрицательная и положительная обратная связь: *U_D – дифференциальное напряжение, U_A – выходное напряжение*



отлично от нуля. Таким образом, выходное напряжение U_A может принимать только два стационарных значения, т.е. максимальное или минимальное значение.

С точки зрения техники автоматического регулирования система регулирования с отрицательной обратной связью состоит из операционного усилителя и контура обратной связи, как показано на рис. 15. С учетом большого значения коэффициента усиления A_D:

$$U_A = A_D\, U_D = A_D\, (U_E - k\, U_A)$$

и общий коэффициент усиления

$$A = \frac{U_A}{U_E} = \frac{A_D}{1 + k\, A_D} \approx \frac{1}{k}.$$

Таким образом, становится ясно, что, несмотря на очень высокий коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи A_D, при помощи отрицательной обратной связи может быть получен конечный коэффициент усиления A. Это более детально поясняется на приведенных ниже примерах.

Идеальный и реальный операционные усилители

Сначала суммируем характеристики идеального операционного усилителя, показанного на рис. 16. Дополнительную информацию см. в [1].

- Синфазное входное сопротивление между входом и землей, где: $r_{GL\,P} = U_P/I_P$; $r_{GL\,N} = U_N/I_N$. В общем случае значение r_{GL} можно проигнорировать.
- Дифференциальное входное сопротивление между двумя входами; здесь: $r_D = (U_P - U_N)/I_P$. r_D увеличивается за счет отрицательной обратной связи.
- Дифференциальное выходное сопротивление $r_A = dU_A/dI_A$. r_A – за счет отрицательной обратной связи снижается.
- Напряжение смещения U_{DS}: количественная характеристика того факта, что даже в случае короткого замыкания между двумя входами (т.е. $U_D = 0$) выходное напряжение U_A не равно нулю.
- Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR): количественная характеристика, описывающая изменение выходного напряжения U_A при одновременном синхронном изменении входных напряжений U_P и U_N (в случае синфазных периодических входных сигналов), т.е., когда U_D остается постоянным.
- Коэффициент подавления пульсаций питания (PSRR): количественная характеристика, описывающая изменение выходного напряжения U_A при изменении напряжений питания.

Поэтому основные идеализации заключаются в следующем:

- Коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи A_D приближается к бесконечности; в случае отрицательной обратной связи имеет место следующее: $U_D = 0$.
- Входные токи I_N и I_P приближаются к нулю.
- Если I_N и I_P близки к нулю, это означает, что синфазное и дифференциальное входные сопротивления приближаются к бесконечности.
- Напряжение смещения U_{DS} приближается к нулю.
- Выходное сопротивление R_A приближается к нулю.
- Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR) приближается к бесконечности, т.е. в случае равного и синфазного

Рис. 15. Отрицательная обратная связь:
U_E – входное напряжение, как значение уставки;
U_A – выходное напряжение; U_D – дифференциальное напряжение на выходе точки суммирования $\oplus$ $U_D = U_E - k\, U_A$
регулируемая система с коэффициентом усиления A_D;
контур обратной связи с коэффициентом усиления k

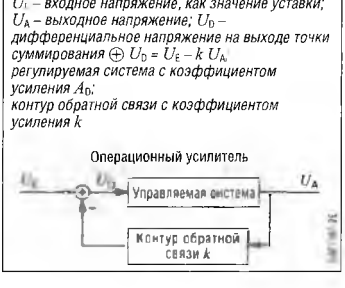
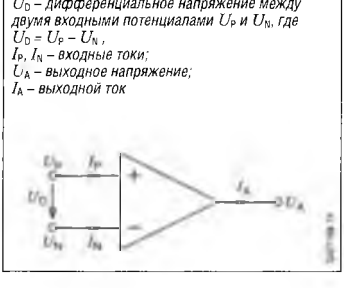


Рис. 16. Идеальный операционный усилитель:
U_D – дифференциальное напряжение между двумя входными потенциалами U_P и U_N, где $U_D = U_P - U_N$,
I_P, I_N – входные токи;
U_A – выходное напряжение;
I_A – выходной ток



изменения напряжений U_P и U_N, U_A остается неизменным.
- Коэффициент ослабления пульсаций питания (PSRR) приближается к бесконечности, т.е. в случае изменения напряжения питания, U_A остается неизменным.
- Поведение усилителя не зависит от частоты.

На практике, разумеется, значения вышеуказанных параметров отличны от идеальных:
- Коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи A_D лежит в диапазоне от 10^4 до 10^7.
- Входные токи I_N и I_P лежат в диапазоне от 10 пА до 2 мкА.
- Синфазное входное сопротивление лежит в диапазоне от 10^6 до 10^{12} Ом, а дифференциальное входное сопротивление достигает 10^{12} Ом.
- Выходное сопротивление R_A лежит в диапазоне от 2 до 50 Ом.
- Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR) лежит в диапазоне от 60 до 140 дБ.
- Коэффициент ослабления пульсаций питания (PSRR) лежит в диапазоне от 60 до 100 дБ.
- Поведение усилителя зависит от частоты (пропускание низких частот).

Основные схемы включения

Характеристики операционного усилителя определяются схемой подключения внешних элементов. Здесь основную роль играет отрицательная обратная связь, поскольку она позволяет точно задать коэффициент усиления за счет выбора значений внешних сопротивлений. Работа различных схем будет пояснена на следующих примерах.

Инвертирующий усилитель

Основная схема инвертирующего операционного усилителя показана на рис. 17. Название может быть приписано отрицательному коэффициенту усиления, т.е. в случае периодического входного напряжения выходное напряжение U_A всегда находится в противофазе к входному напряжению U_1. При этом важно то, что за счет отрицательной обратной связи и высокого коэффициента усиления при разомкнутой цепи обратной связи A_D дифференциальное напряжение U_D на входе постоянно равно нулю, поскольку инвертирующий и неинвертирующий входы находятся под одним и тем же потенциалом. Поскольку за счет отрицательной обратной связи дифференциальное напряжение U_D регулируется до нуля, это имеет название «виртуального короткого замыкания». Также используется термин «виртуальная масса», поскольку инвертирующий вход активно находится под нулевым потенциалом (т.е. потенциалом корпуса). Кроме того, значения входных токов игнорируются, в частности, устанавливается $I_N = 0$. Имеют место следующие соотношения:

$$I_{R1} = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_{R2} = -\frac{U_A}{R_2},$$

где $I_{R1} = I_{R2}$, отсюда следует:

$$U_A = -\frac{R_2}{R_1} U_1$$

Таким образом, выходное напряжение U_A прямо зависит от входного напряжения U_1 и выбора сопротивлений R_2 и R_1.

Неинвертирующий усилитель

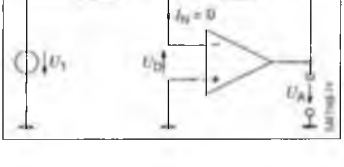
Неинвертирующий усилитель можно рассмотреть аналогично инвертирующему усилителю (см. рис. 18). За счет отрицательной обратной связи, $U_D = 0$. Поскольку $I_{R1} = I_{R2}$, в соответствии с делителем напряжения, состоящим из сопротивлений R_1 и R_2 имеет место следующее соотношение:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_A,$$

Отсюда следует, что

$$U_A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_1$$

Рис. 17. Инвертирующий усилитель:
U_1 – входное напряжение;
U_D – дифференциальное напряжение;
U_A – выходное напряжение;
R_1, R_2 – внешние резисторы;
I_{R1}, I_{R2} – токи, протекающие через резисторы R_1 и R_2;
I_N – входной ток



Здесь выходное напряжение U_A также прямо зависит от входного напряжения U_1 и значений сопротивлений R_2 и R_1; однако здесь коэффициент усиления U_A/U_1 имеет значение не менее единицы; U_A и U_1 синфазны.

Особым случаем неинвертирующего усилителя является развязывающий усилитель или преобразователь импеданса. Если R_1 принимает значение, равное бесконечности (разомкнутый контур), R_2 равно нулю (короткое замыкание) (см. рис. 19), коэффициент усиления равен единице (т.е. $U_A = U_1$).

Преимущество этой схемы заключается в том, что источник входного напряжения U_1 не нагружен внутренним сопротивлением R_E, поскольку входной ток I_P приблизительно равен нулю. Это приводит к пренебрежимо малому падению напряжения на R_E, а поскольку $U_D = 0$, входное напряжение U_1 передается на выход операционного усилителя как U_A. Это является важным свойством этой схемы, в особенности для усиления сигналов датчиков, поскольку во многих случаях допустимый ток нагрузки датчика очень мал, т.е. любое увеличение нагрузки датчика вызывает значительное снижение величины его полезного сигнала.

Рис. 18. Неинвертирующий усилитель:
U_1 – входное напряжение,
U_D – дифференциальное напряжение,
U_A – выходное напряжение;
R_1, R_2 – внешние резисторы,
I_{R1}, I_{R2} – токи, протекающие через резисторы R_1 и R_2,
I_N – входной ток

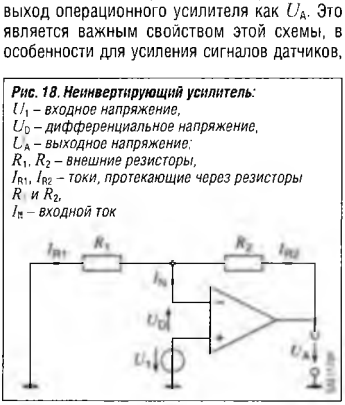
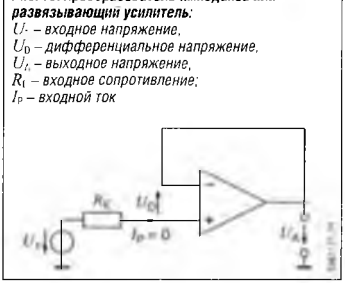


Рис. 19. Преобразователь импеданса или развязывающий усилитель:
U_1 – входное напряжение,
U_D – дифференциальное напряжение,
U_A – выходное напряжение,
R_1 – входное сопротивление;
I_P – входной ток



Вычитающий усилитель

Вычитающий операционный усилитель (см. рис. 20) можно рассматривать как вариант двух описанных выше схем. Соотношение между выходным напряжением U_A и входными напряжениями U_1 и U_2 можно вывести в соответствии с принципом суперпозиции.

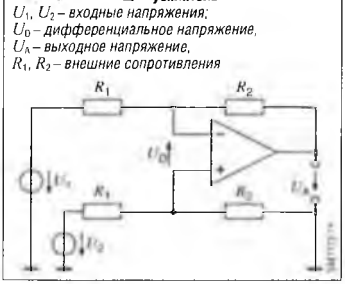
$$U_A = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) .$$

Измерительный усилитель

В измерительных системах с датчиками и измерительными мостами часто требуется усиление дифференциального напряжения без неприемлемо высокой нагрузки датчика или моста. Это может быть реализовано при помощи высокоимпедансного переключателя напряжения. Для этой цели может быть использован измерительный усилитель, на выходе которого имеет место усиленная разность двух потенциалов U_2 и U_1 в виде выходного напряжения U_A. Измерительный усилитель можно разделить на две части: предварительный усилитель и вычитающий усилитель (см. рис. 20) с дальнейшим усилением. На рис. 21 представлена схема контура предварительного усиления измерительного усилителя.

В соответствии с правилом отрицательной обратной связи разность напряжений на инвертирующем и неинвертирующем входах равна нулю. В каждом случае ток I может протекать через резисторы R и R', поскольку входные токи I_{N1} и I_{N2} могут быть проигнорированы. Имеет место следующее:

Рис. 20. Вычитающий усилитель:
U_1, U_2 – входные напряжения;
U_D – дифференциальное напряжение,
U_A – выходное напряжение,
R_1, R_2 – внешние сопротивления



$I = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{U_{A1} - U_{A2}}{2R + R}$, таким образом

$U_{A1} - U_{A2} = (U_1 - U_2)\left(\frac{2R}{R} + 1\right)$.

Таким образом, усиленная разность двух напряжений U_1 и U_2 получается, как разность напряжений U_D на двух выходах двух операционных усилителей. Для вывода этого напряжения U_D, как выходного напряжения относительно массы U_A может быть последовательно подключен вычитающий усилитель (см. рис. 20), где U_{A1} подается вместо U_1 и U_{A2} подается вместо U_2.

Важные характеристики

В ряде случаев к операционному усилителю предъявляются отчасти противоречащие друг другу требования. Имеется ряд операционных усилителей, специально оптимизированных для того или иного применения. Как правило, для них указываются данные конкретных рабочих режимов или рабочие диапазоны.

Диапазон температур

В области бытовой электроники диапазон рабочих температур, как правило, составляет от 0 до 70 °C. Для промышленного применения обычно указывается диапазон от –20 до +70 °C, прежде всего для устройств, эксплуатируемых на открытом воздухе. Для военных применений указывается диапазон рабочих температур от –55 до +125 °C. Однако, даже столь широкий диапазон может оказаться недостаточным для применения этих электронных устройств на автомобилях; например, в моторном отсеке или в тормозной системе могут иметь место еще более высокие температуры.

Напряжение смещения

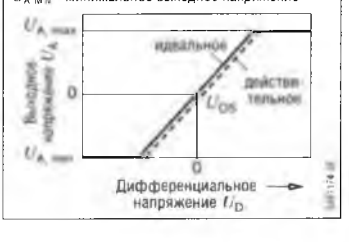
Напряжение смещения – количественная характеристика того факта, что даже в случае короткого замыкания между двумя входами (т.е. для $U_D = 0$) выходное напряжение U_A не равно нулю. Напряжение U_{OS} называется напряжением смещения. Это напряжение действует подобно напряжению внешнего источника U_D и складывается с ним. Напряжение смещения U_{OS} может быть определено как напряжение на входе, необходимое для того, чтобы выходное напряжение U_A было равно нулю (см. рис. 22). Необходимость напряжения смещения U_{OS} вытекает, среди прочего, из асимметрии внутренних входных цепей операционного усилителя. Величина напряжения смещения составляет от нескольких мкВ до нескольких мВ.

Однако, так же как напряжение смещения U_{OS}, большое значение имеют температурный эффект и долгосрочная стабильность. Некоторые операционные усилители предлагают возможность компенсации напряжения смещения при помощи внешних цепей (при условии, что эта компенсация не реализована внутренними мерами). В этой связи важно отметить, что вследствие температурного эффекта может иметь место дрейф входного напряжения; так, паяные соединения могут действовать как термопары с выходным напряжением от 10 до 100 мВ/К.

Рис. 21. Схема подсистемы предварительного усиления измерительного усилителя:
U_1.. U_2 – входные напряжения; I_{B1}, I_{B2} – входные токи; I – ток; R, R' – сопротивления; U_{A1}, U_{A2} – выходные напряжения относительно массы



Рис. 22. Напряжение смещения:
U_E – выходное напряжение,
U_D – дифференциальное напряжение между входами;
U_{OS} – напряжение смещения,
$U_{A\,MAX}$ – максимальное выходное напряжение;
$U_{A\,MIN}$ – минимальное выходное напряжение



Входные сопротивления и токи

За счет, как правило, очень малых входных токов I_N и I_P могут быть получены очень большие входные сопротивления, которые могут достигать нескольких МОм. Здесь следует различать синфазное входное сопротивление (сопротивление между каждым входом и массой) и дифференциальное входное сопротивление между двумя входами.

Входы обычного операционного усилителя представляют собой транзисторы. Это могут быть биполярные транзисторы, в которых активируется база, или полевые MOS-транзисторы, в которых напряжение подается на затвор. Этим объясняются малые значения входных токов. Если используются биполярные транзисторы, это токи базы, лежащие в диапазоне нескольких мкА. Если в качестве входных устройств используются полевые MOS-транзисторы – это соответствующие токи затворов, требуемые для перезарядки емкостей затворов. Эти токи пропорциональны рабочей частоте и обычно составляют несколько пА.

Входной ток смещения может вызвать погрешность входного напряжения в цепях высокого сопротивления. Эту погрешность можно скомпенсировать, подключив к двум входам два идентичных импеданса, поскольку в каждом случае имеет место одинаковое падение напряжения, и дифференциальное напряжение U_D остается неизменным. Так же как в отношении напряжения смещения, могут иметь место температурный дрейф и дрейф во времени входного тока.

Выходное сопротивление

Выход операционного усилителя можно представить, как последовательно соединенные идеальный источник напряжения и сопротивление. При этом сопротивление представляет собой выходное сопротивление R_A. Это сопротивление ограничивает величину выходного тока. В общем случае выходной ток операционного усилителя может достигать 20 мА. Существует несколько типов операционных усилителей с выходным током до 10 А.

Скорость нарастания выходного напряжения

Скорость нарастания выходного напряжения (SR) означает максимальное возможное изменение выходного напряжения U_A за определенный период времени, т.е. максимальное значение dU_A/dt. Значения скорости нарастания выходного напряжения для обычных операционных усилителей лежат в диапазоне от 1 В/мкс до свыше 1 В/нс.

Уровень шума

Уровень шума операционного усилителя можно охарактеризовать плотностью напряжения шума или плотностью тока шума. Обычно плотность напряжения шума U_R' указывается в нВ/Гц.

Действующее значение напряжения шума U_R (это также относится к току шума) получается путем умножения соответствующего значения плотности напряжения шума на квадратный корень из полосы частот B.

$$U_R = U_R' \sqrt{B} .$$

Для цепи усилителя общее действующее значение плотности напряжения шума определяется как квадратный корень из суммы квадратов отдельных действующих значений.

$$U_{R,tot}' = \sqrt{(U_{R,1})^2 + (U_{R,m})^2} .$$

Здесь m – количество элементов – источников шума.

Уровень шума обычно определяется на входе операционного усилителя. Использование полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом или полевых MOS-транзисторов дает низкое значение входных токов, но в то же время относительно высокий уровень шума. Что касается операционного усилителя на биполярных транзисторах, то здесь ситуация изменяется на противоположную (см. [1] и [4]).

Монолитные интегральные схемы

Монолитная интеграция

Планарная технология основана на окислении кремниевых подложек, которое представляет собой относительно простой процесс. Скорость, с которой легирующие присадки проникают в кремний, значительно выше скорости их проникновения в оксид. Поэтому легирование имеет место только в тех местах, где в слое оксида имеются соответствующие окна. Точная геометрическая конфигурация, наносимого на подложку слоя оксида определяется конкретными конструктивными требованиями к той или иной интегральной схеме. Все технологические процессы (окисление, травление, легирование и осаждение) выполняются последовательно в приповерхностном слое подложки (планарная технология).

Планарная технология позволяет производить все компоненты схемы (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, тиристоры) и соединительные проводники, получать отдельные кремниевые кристаллы в едином производственном процессе. Новые полупроводниковые устройства были объединены для производства монолитных интегральных схем (IC: интегральная схема).

Эта интеграция обычно охватывает ту или иную подсистему электронной схемы и во все большей степени включает всю систему: «система на чипе».

В связи с постоянно возрастающей плотностью компонентов (плотностью интеграции), в конструкции все в большей степени используется третье измерение, т.е. вертикальная плоскость. Это позволяет (особенно в области силовых электронных устройств) снизить сопротивление, уменьшить потери и достичь более высоких плотностей тока.

Уровни интеграции

Уровень интеграции представляет собой меру количества функциональных элементов в одном чипе. Имеет место следующая классификация интегральных схем по степени интеграции (и площади поверхности чипа):

- SSI (низкая степень интеграции) – до нескольких сотен функциональных элементов в чипе при средней площади поверхности чипа 1 мм^2. Однако в интегральных схемах, включающих силовые элементы (например, силовые транзисторы) площадь поверхности чипа может быть значительно больше.
- MSI (средняя степень интеграции) – от нескольких сотен до 10 000 функциональных элементов в чипе при средней площади поверхности 8 мм^2.
- LSI (высокая степень интеграции) – до 100 000 функциональных элементов в чипе при средней площади поверхности 20 мм^2.
- VLSI (сверхвысокая степень интеграции) – до 1 миллиона функциональных элементов в чипе при средней площади поверхности 30 мм^2.
- ULSI (ультравысокая степень интеграции) – свыше 1 миллиона функциональных элементов в чипе (современные запоминающие устройства (флэш-память) содержат до 20 миллиардов транзисторов) при средней площади поверхности чипа 300 мм^2 и размерах отдельных структурных элементов ≤ 30 нм.

Методы автоматизированного моделирования и проектирования (CAE/CAD) являются существенными элементами производства интегральных схем. При сверхвысокой (VLSI) и ультравысокой (ULSI) степенях интеграции применяются полнофункциональные блоки, что позволяет снизить затраты времени и риск повреждения интегральных схем. Для обнаружения дефектов используются моделирующие программы.

Микропроцессоры в блоке управления

Микропроцессоры, микрокомпьютеры, микроконтроллеры

Микропроцессор

Микропроцессор – интегрированный в монокристалле центральный процессор. Его конструкция такова, что микропроцессор может быть запрограммирован под различные требования в зависимости от специфических рабочих условий. Имеются две основных группы микропроцессоров. Предыдущие поколения персональных компьютеров использовали процессоры CISC (компьютер с комплексным набором команд). В таких процессорах реализуется очень большое количество специальных команд, выполняемых в виде определенного количества тактовых импульсов. Процессоры RISC (RISC: компьютер с упрощенным набором команд) обычно используются во «вложенном поле», куда включаются также и «автомобильные» приложения. Преимуществом процессоров RISC является тот факт, что для их команд обычно требуется только один тактовый импульс и для обеспечения высокой производительности необходимы более простые и быстрые команды.

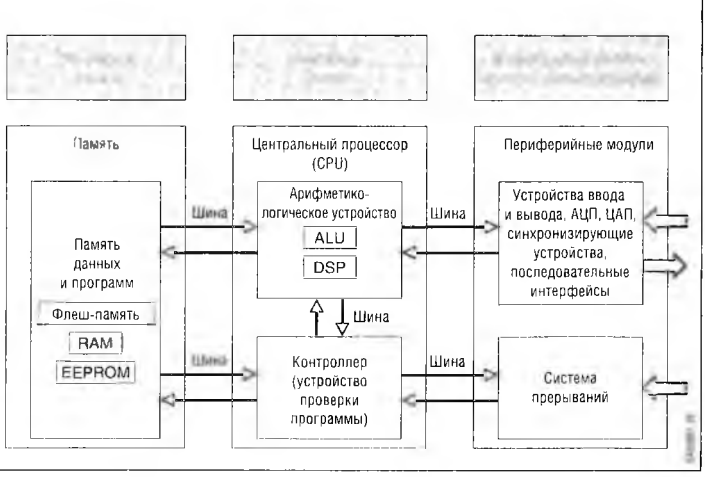
Современные процессоры RISC оперируют более чем 300 командами, больше чем старые процессоры CISC, таким образом, для их сравнения более правильным будет сравнивать среднее количество тактовых импульсов на команду, а не количество команд.

Микропроцессор не может функционировать самостоятельно. Он действует как часть микрокомпьютера.

Микрокомпьютеры

Микрокомпьютер представляет собой микропроцессор, выполняющий роль центрального процессора (CPU). Микропроцессор состоит из контроллера и арифметико-логического устройства (рис. 1). Арифметико-логическое устройство выполняет арифметические и логические операции, а также операции по обработке цифровых сигналов, в то время как контроллер обрабатывает команды и данные из памяти. Для обеспечения более высоких тактовых частот используются информационные каналы, которые предварительно обрабатывают команды (например,

Рис. 1. Конструкция микрокомпьютера:
CPU – центральный процессор; ALU – арифметико-логическое устройство;
DSP – процессор цифровой обработки сигналов; RAM – оперативное запоминающее устройство,
EEPROM – электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь



прием инструкций и данных, запись данных). Арифметико-логическое устройство встраивается в информационный канал.

Рабочая программа (пользовательская программа) хранится постоянно (энергонезависимо) в памяти программы (ROM, PROM, EEPROM или флеш-памяти). После деактивации данные продолжают быть доступными даже при отключении напряжения питания. В современных приложениях программная память обычно выполнена в виде флеш-памяти.

Данные, используемые в любое заданное время, хранятся в запоминающем устройстве данных. Эти данные меняются и сохраняются в RAM (оперативное запоминающее устройство).

В микрокомпьютер может быть встроена кэш-память (в серийно производимых с 2006 года системах управления двигателем Bosch) для программной памяти и памяти данных. Если бы требуемые команды и данные всегда отправлялись по шинам при отсутствии кэш-памяти в системе, высокие скорости передачи данных (которые необходимы процессору для работы) и относительно медленный доступ к памяти снизили бы скорость работы центрального процессора катастрофическим образом, и высокоскоростной процессор оказался бы бесполезным.

Отдельные элементы в компьютере связывает система шин. Тактовый генератор задает интервал времени или ритм для всех операций, выполняемых компьютером. Логические схемы – это микрочипы, которые выполняют специальные задачи, например, необходимые для прерывания и перезагрузки логики (для перезагрузки микропроцессора). Входные/выходные схемы служат для контроля данных связи с периферийными устройствами. Периферийные устройства включают, например, входные схемы для сигналов коленчатого и распределительного валов, переключатели, аналоговые входные контуры и усилители мощности, такие как Н-мосты или переключатели.

Микроконтроллер

Бортовые автомобильные приложения должны работать так, чтобы последовательность программ ЭБУ соответствовала физическим последовательностям. Таким образом, система должна в минимально короткий промежуток времени реагировать, например, на изменения входных сигналов. Соответственно, системы должны обладать «производительностью в реальном времени». ЭБУ для данных приложений имеет расширение в микрокомпьютер для этих целей. Формирование пакета данных в реальном времени осуществляется с помощью блока синхронизации. Основными принципами работы здесь являются захват и сравнение. Функция захвата входных сигналов присваивает время или метку угла поворота, (например, коленчатого вала) событиям во входной цепи. Процессор, таким образом, не должен продолжать обработку сигнала прямо сейчас. Например: если сигнал коленчатого вала меняется от «высокий» на «низкий», что означает изменения на боковой поверхности зуба, нет необходимости немедленно прерывать процесс, чтобы запустить программное обеспечение, определяющее текущий угол с целью определения скорости вращения на более поздней стадии. Это осуществляется синхронизирующим оборудованием. При изменении боковой поверхности состояние таймера угла сохраняется в реестре – после чего программное обеспечение имеет время выполнить свою работу и затем получить данные угла из реестра для дальнейшей обработки.

Функция сравнения выходных сигналов генерирует событие (например, коммутацию катушки зажигания в момент зажигания) на выходном контакте в определенное время или при определенном угле.

Микрокомпьютеры, имеющие производительность в реальном времени, называются микроконтроллерами. В настоящее время они обычно интегрированы в микрочипы и не выполняются, как раньше, в виде дискретных компонентов на печатных платах. Это стало возможным благодаря современным технологиям, при которых в микрочип можно интегрировать очень сложные системы. Например, микроконтроллер системы управления двигателем Bosch, выпускаемый серийно с 2006 года, содержит 40 миллионов транзисторов; Pentium II имел приблизительно 6,7 миллионов транзисторов.

Для будущих приложений будет уже не достаточно иметь только один центральный процессор, поскольку тактовую частоту нельзя увеличить, как угодно пользователю, и это так же приводит к увеличению тока во входных схемах. По этой причине, микроконтроллеры появятся в версиях более чем с одним центральным процессором (более чем пять центральных процессоров на одном чипе будут серийно производиться для систем управления двигателем Bosch с 2015 года) – та же тенденция, что и у систем персонального компьютера.

Микроконтроллеры, используемые в автомобильной промышленности, отличаются от стандартных по многим параметрам.

- Диапазон температуры: –40...150 °C.
- Интенсивность отказов: менее чем один отказ на один миллион компонентов – сравните с 100...200 отказали на миллион компонентов у персонального компьютера.
- Срок службы: в настоящее время определяется как 20 000 часов активной эксплуатации.
- Существенно более длительная эксплуатационная готовность: поскольку по окончании производственного цикла в 1...3 года не ожидается поставка новых микроконтроллеров для мобильных телефонов и персональных компьютеров, в сложных проекта автомобильной промышленности серийное производство запускается только через 3...5 лет разработок, после чего оно продолжается еще в течение 15 лет и затем поставки производятся еще следующие 15 лет.

Полупроводниковые запоминающие устройства

Принципы организации памяти

Накопление данных включает: регистрацию (запись), постоянное запоминание (хранение данных в узком смысле), извлечение и вывод (чтение). В полупроводниковых запоминающих устройствах используются физические процессы, «проводящий/непроводящий» или «заряженный/разряженный», позволяющие однозначно распознать одно из двух противоположных состояний (информация в двоичном коде). В полупроводниковых устройствах памяти воспроизводятся состояния «проводящий» и «непроводящий» или «заряженный» и «разряженный»; последнее состояние основывается на специальных свойствах перехода между кремнием и оксидом кремния или между нитридом кремния и металлом. Технологией, активно использующейся сейчас, является флеш-память. Устройства памяти, работающие по данному принципу, электрически программируемые и стираемые.

В будущем также будут использоваться новые виды памяти: FRAM использует принцип магнитоэлектрического запоминающего устройства, MRAM использует магнитный эффект в качестве принципа запоминания, и PCM (память на основе фазового перехода) для эффекта запоминания использует изменение состояния материала от кристаллического до аморфного и соответствующее изменение сопротивления.

Классификация

Полупроводниковые запоминающие устройства подразделяются на две основных категории: энергозависимые и энергонезависимые – практически все они производятся по технологии CMOS.

Энергозависимые запоминающие устройства могут считываться и перезаписываться любое количество раз и поэтому называются оперативным запоминающим устройством (RAM); объем информации стирается при отключении питания.

Энергонезависимые запоминающие устройства сохраняют данные при отключении источника питания; они также известны как постоянное запоминающее устройство (ROM).

В будущем MRAM и PCM (не появятся в управлении двигателем раньше 2018 года), возможно, вытеснят флеш-память (энергонезависимую, но медленную) и RAM (быструю, но энергозависимую), используемые сегодня, поскольку они сохраняют данные после отключения питания и имеют очень короткое время доступа.

Список литературы

[1] Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungtechnik, 13th Edition, Springer-Verlag, 2010.

[2] Führer, A.; Heidemann, K.; Nerreter, W.: Grundgebiete der Elektrotechnik, Volumes 1–3, Carl Hanser Verlag, Munich, Vienna.

[3] Ose, R.: Elektrotechnik für Ingenieure. Carl-Hanser-Verlag, 2007.

[4] R. Müller: Rauschen, Springer Verlag, 1989.

Электрохимия

Проводимость электролитов и электролиз

При растворении соли в воде ее компоненты присутствуют в воде в форме ионов. Эти ионы заряжены таким образом, что под воздействием электрического поля они перемещаются, соответственно, генерируя электрический ток. Данное явление известно как электропроводность электролита. Для сравнения, ток в электрическом проводнике, например, меди или железе, представляет собой поток электронов. Помимо водных растворов, электролитами могут быть расплавы солей, а также некоторые твердые вещества (например, диоксид циркония в каталитических нейтрализаторах легковых автомобилей) ([1], [2] и [3]).

Отрицательно заряженные ионы перемещаются в сторону анода (положительный полюс) и поэтому называются анионами, в то время как положительно заряженные ионы (катионы) притягиваются катодом (отрицательный полюс). На данных электродах происходит химическая реакция, во время которой ионы либо поглощают электроны, расположенные на катоде, либо высвобождают электроны, которые оседают на аноде. Эти реакции могут происходить, только в том случае, если катод и анод имеют электропроводящее соединение друг с другом для обеспечения обмена электронами между ними.

Электрохимические ряды металлов

Интенсивность, с которой происходит данная реакция, определяется электрохимическим рядом металлов, приведенным в табл. 1. В таблице указан нормальный потенциал E^0, соответствующий концентрации 1 моль/л. Данная «нормальная» концентрация показана надстрочным индексом 0. Напряжения, приведенные в таблице, относятся к стандартному нормальному водородному электроду, потенциал которого принимается равным 0 В. Соответственно, допустимо следующее:

$$E^0(2H^+ + 2e^- \longleftrightarrow H_2) = 0 \text{ В}.$$

В табл. 1 знак «плюс» для E^0 показывает поглощение электронов (восстановление), а «минус» означает их высвобождение (окисление). Например, литий в основном высвобождает электроны ($E^0 < 0$) и окисляется, превращаясь в однозарядный ион Li^+, в то время как фтор поглощает электроны ($E^0 > 0$) и таким образом восстанавливается.

Окисление: $2\,Li \longrightarrow 2\,Li^+ + 2e^-$, $E_{Li} = +3{,}045$ В.

Восстановление: $F_2 + 2e^- \longrightarrow 2\,F^-$, $E_F = +2{,}87$ В.

Уравнение баланса: $2\,Li + F_2 \longrightarrow 2\,Li^+ + 2\,F^-$, $E = +5{,}915$ В.

Электрохимическая реакция, таким образом, всегда состоит из двух неполных этапов окисления и восстановления. Поскольку литий высвобождает электроны, они стоят с правой стороны уравнения реакции в сравнении с обозначением в электрохимическом ряду металлов (табл. 1) Таким образом, знак перед значением напряжения для данного уравнения окисления меняется на противоположный. Общее напряжение E окислительно-

Таблица 1. Электрохимический ряд металлов ([3]) и соответствующие ионные реакции (нормальные потенциалы при 25 °C)

Полуреакции	E^0 [В]
$Li^+ + e^- \longleftrightarrow Li$	−3,045
$Na^+ + e^- \longleftrightarrow Na$	−2,714
$Mg^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Mg$	−2,363
$Al^{3+} + 3e^- \longleftrightarrow Al$	−1,662
$2H_2O + 2e^- \longleftrightarrow H_2 + 2OH^-$	−0,828
$Zn^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Zn$	−0,763
$Cr^{3+} + 3e \longleftrightarrow Cr$	−0,744
$Fe^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Fe$	−0,440
$PbSO_4 + 2e \longleftrightarrow Pb + SO_4^{2-}$	−0,356
$Ni^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Ni$	−0,250
$Pb^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Pb$	−0,13
$Sn^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Sn$	−0,136
$2H^+ + 2e^- \longleftrightarrow H_2$	0
$Cu^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Cu$	+0,337
$Cu^+ + e^- \longleftrightarrow Cu$	+0,521
$Fe^{3+} + e^- \longleftrightarrow Fe^{2+}$	+0,771
$Ag^+ + e^- \longleftrightarrow Ag$	+0,799
$Pt^{2+} + 2e^- \longleftrightarrow Pt$	+1,118
$4H^+ + O_2 + 4e^- \longleftrightarrow 2H_2O$	+1,229
$Cl_2 + 2e^- \longleftrightarrow 2Cl$	+1,360
$Au^{3+} + 3e^- \longleftrightarrow Au$	+1,498
$PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \longleftrightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$	+1.685
$F_2 + 2e \longleftrightarrow 2F^-$	+2,87

восстановительной реакции складывается из отдельных напряжений Соответственно, уравнение баланса не учитывает электроны, поскольку обмен ими происходит только между реагирующими веществами.

Электрохимическая реакция, таким образом, может происходить только в том случае, если общее напряжение является положительным. Поэтому кислоты (например, ионы H^+) не могут растворять медь, серебро, платину и золото. Эти металлы называются благородными. В противоположность им, неблагородные металлы, такие как натрий, элементарное железо, никель и свинец подвержены воздействию кислот и растворяются как ионы.

Чтобы электрохимическая реакция могла произойти, требуется как минимум два разных реагента. Результирующее общее электрохимическое напряжение E зависит от концентрации ионов.

Уравнение Нернста

Уравнение Нернста выглядит так:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox]}{[Red]}$$

$$= E^0 + \frac{0{,}0592\ \text{В}}{n} \log_{10} \frac{[Ox]}{[Red]} \text{ (при 25 °C)}$$

где, [Ox] – концентрация окислившихся ионов, [Red] – концентрация восстановленных ионов, n – количество электронов в уравнении реакции, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура и F – постоянная Фарадея.

В этом случае потенциал может рассчитываться для каждой частичной химической реакции с отдельными типами ионов. Общее напряжение электролитической реакции суммируется из общего количества всех потенциалов частичных реакций Кроме того, E зависит от температуры.

Применение метода

Свинцовая аккумуляторная батарея

Заряд и разряд

В свинцовых аккумуляторных батареях легковых автомобилей происходят следующие электрохимические реакции разряда:

анод: $Pb \longrightarrow Pb^{2+} + 2e^-$;
катод: $Pb^{4+} + 2e^- \longrightarrow Pb^{2+}$

Эти реакции происходят в серной кислоте, где свинцовый сурик катода (PbO_2 с Pb^{4+}) восстанавливается до сульфата свинца ($PbSO_4$ с Pb^{2+}), в то время как на аноде элементарный свинец (Pb) аналогично окисляется до сульфата свинца. Электролит, таким образом, теряет ионы SO_4 (сульфат) и его плотность уменьшается. В процессе заряда сульфат свинца превращается обратно в свинец и свинцовый сурик.

Серная кислота H_2SO_4 не включена в уравнения реакции, приведенного выше, в целях акцентирования внимания на центральных реакциях. Эти реакции обеспечивают напряжение на уровне примерно 2,0 В (см. табл. 1). Данные реакции происходят в обратном направлении при заряде аккумуляторной батареи во время движения автомобиля.

Поскольку описанная выше электрохимическая реакция протекает очень медленно, электроды выполняются в виде решетки для обеспечения большой поверхности реакции Свинец и свинцовый сурик изготавливаются в виде пористой губкообразной пасты и наносятся на эти решетки.

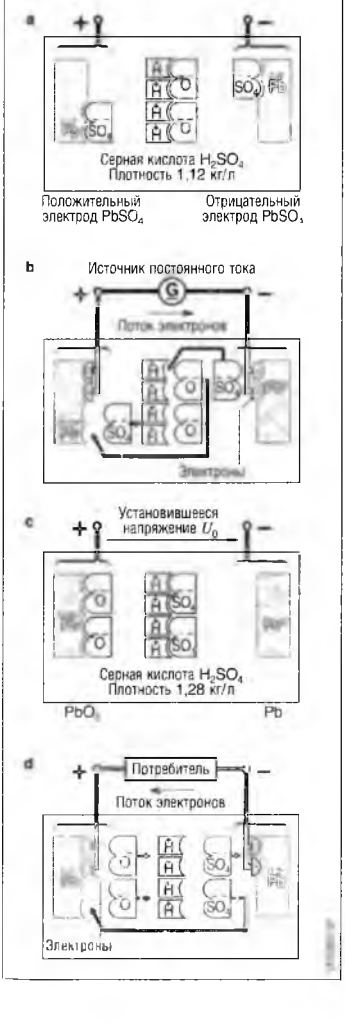
Аккумуляторная батарея должна перезаряжаться без падения напряжения при полном заряде в процессе работы. Она также должна быть рассчитана на хранение большого объема энергии при минимальной массе (емкости) и обеспечение высокой силы тока.

В частности, происходят процессы, показанные на рис. 1.

Разряженный гальванический элемент перед зарядом

На обоих электродах располагается сульфат свинца $PbSO_4$, имеющий два иона – Pb^{2+} и SO_4^{2} (рис. 1, а). Электролит имеет меньшую плотность, поскольку он теряет ионы сульфата при потреблении тока.

Рис. 1. Процессы заряда и разряда свинцовой аккумуляторной батареи:
a – разряженный гальванический элемент перед зарядкой, b – процесс заряда; c – заряженный гальванический элемент; d – процесс разряда



Процесс заряда

На положительном электроде Pb^{2+} превращается в Pb^{4+} благодаря эмиссии электронов (рис. 1, в). Он объединяется с кислородом и образует PbO_2 С другой стороны, на отрицательном электроде формируется элементарный свинец. Обе эти реакции сопровождаются высвобождением ионов сульфата SO_4^{2-}, которые вместе с ионами H^+ снова образуют серную кислоту и, соответственно, увеличивают плотность электролита.

Заряженный гальванический элемент

$PbSO_4$ на положительном электроде превращается в PbO_2, а $PbSO_4$ на отрицательном электроде превращается в Pb (рис. 1с). дальнейшего увеличения плотности электролита не происходит.

Если после достижения состояния полного заряда на гальванический элемент продолжает действовать напряжение заряда, происходит только электролитическое разложение воды. Оно сопровождается выделением гремучего газа (кислород на положительном электроде, водород на отрицательном).

Процесс разряда

Направление тока и электрохимические процессы при разряде являются противоположными по отношению к зарядке, что приводит к тому, что ионы Pb^{2+} и SO_4^{2-} на обоих электродах объединяются и образуют продукт разряда $PbSO_4$ (рис. 1d).

Никель-металлогидридная аккумуляторная батарея

В гальваническом элементе NiMH (никель-металлогидрид) используется металлический электрод, способный аккумулировать водород [3]. В процессе заряда аккумуляторной батареи генерируется атомарный водород. Этот водород поглощается металлическим электродом (M) с образованием металлогидрида (MH). При разрядке накопленный водород окисляется на электроде, превращаясь в воду (рис. 2). При заряде наблюдается обратный процесс:

Анод: $MH + OH^- \longrightarrow M + H_2O + e^-$ (0,83 В).

Катод: $NiOOH + H_2O + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$ (0,49 В)

Уравнение окислительно-восстановительной реакции: $MH + NiOOH \longrightarrow Ni(OH)_2 + M$ (1,32 В)

Никель-металлогидридные аккумуляторные батареи имеют высокую интенсивность саморазряда, до 1 % при комнатной температуре, что ограничивает их использование только оборудованием с коротким сроком службы. Они часто применяются в электромобилях и гибридных транспортных средствах, поскольку обеспечивают большую силу тока и высокую зарядную емкость при малом весе.

Литий-ионная аккумуляторная батарея

Литий-ионная аккумуляторная батарея использует принцип обратимого присоединения ионов лития (Li^+) к решетке и удаления их (интеркалированный электрод, [3]). Например, графит (C) различных модификаций используется в качестве материала для анода, а оксиды металлического лития (например, $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$) применяются как материал для катода (рис. 3).

Анод: $Li_xC_n \longrightarrow n\,C + x\,Li^+ + x\,e^-$.

Катод: $Li_{1-x}Mn_2O_4 + x\,Li^+ + x\,e^- \longrightarrow LiMn_2O_4$

Уравнение баланса: $Li_{1-x}Mn_2O_4 + Li_xC_n \longrightarrow Li\,Mn_2O_4 + n\,C$.

В зависимости от используемого катода (каменноугольный кокс), что выражается с помощью индекса n, соотношение x интеркалированного лития меняется. Электролит состоит из смешанного неводного растворителя (например, поливинилиденфторида) и проводящей соли (например, $LiPF_6$).

Литий-ионные аккумуляторные батареи обладают высокой плотностью энергии, термостабильностью и обеспечивают напряжение до 4,2 В.

Коррозия и защита от коррозии

В случае коррозии в водной или газообразной среде происходят нежелательные электрохимические реакции, способные разрушить компоненты (например, кузов) или даже вызвать отказ компонентов. В такой ситуации, к примеру, атомы железа кузова разлагаются как ионы, в результате чего толщина листа металла уменьшается, могут появиться сквозные отверстия в металле и, помимо ухудшения внешнего вида (очаги коррозии), вся механическая жесткость автомобиля может быть снижена.

Задачей автомобильной промышленности является защита металлических компонентов автомобилей от коррозии различными способами. Для этих целей металл может покрываться основным веществом, таким как цинк, который, при необходимости, подвергается коррозии вместо стали. В качестве альтернативного способа за счет ингибиторов может вызываться реакция окисления, в то время как лакокрасочное покрытие замедляет диффузию кислорода с поверхностью металла.

Рис. 2. Электрохимические процессы в никель-металлогидридной аккумуляторной батарее:
a – разряд, b – заряд; 1 – анод; 2 – катод; 3 – электролит; R – сопротивление; I – ток заряда

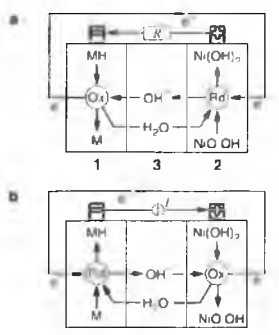
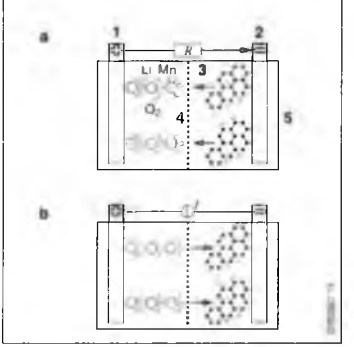


Рис. 3. Электрохимические процессы в литий ионной аккумуляторной батарее:
a – разрядка; b – зарядка, 1 – анод; 2 – катод, 3 – электролит; 4 – перегородка; 5 – корпус гальванического элемента



Коррозионное разрушение

Как и электрохимическая реакция, коррозионное разрушение состоит из двух частичных реакций – анодного окисления и катодного восстановления. В случае окисления, атомы металла теряют электроны и растворяются в виде ионов или образуют отложения на поверхности («побежалость») с другими реагирующими веществами. Этот процесс составляет основу коррозионной реакции. В отличие от электрохимической реакции, коррозионное разрушение происходит само по себе, т.е. для него не требуется источник напряжения.

В процессе восстановления ионы кислорода и водорода часто выступают в роли реагирующих веществ для анодного растворения металла. В нейтральной или щелочной среде кислород восстанавливается до ионов гидроксида:

$$O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^- \longrightarrow 4\,OH^-.$$

В кислотной среде ионы водорода кислоты реагируют с образованием водорода, который выделяется в виде газа.

$$2\,H^+ + 2\,e^- \longrightarrow H_2$$

Элекрохимический ряд металлов (табл. 1) показывает, насколько велик риск коррозии для различных металлов и какие материалы могут защитить от коррозии. В таблице не дается информация о скорости распространения коррозионной реакции. В таблице также не учитывается тот факт, что многие металлы (такие как алюминий, например) в воздушной среде образуют слой оксида, обеспечивающий временную защиту от коррозии.

Рис. 4. λ-датчик (датчик пальцевого типа) в выхлопной трубе:
1 – керамика на основе диоксида циркония, 2 – электроды; 3 – выхлопная труба, 4 – пористый керамический защитный слой; 5 – отработавшие газы, 6 – наружный воздух (контрольная среда)



Датчики концентрации кислорода

Датчик концентрации кислорода (λ-датчик) измеряет содержание остаточного кислорода в отработавших газах и таким образом регулирует подачу воздуха для формирования оптимальной топливно-воздушной смеси для сгорания в двигателе с искровым зажиганием ($\lambda = 1$, стехиометрическое горение). В этой связи в качестве твердого электролита используется керамика на основе диоксида циркония (ZrO) (рис. 4), поскольку она проводит ионы кислорода при температурах выше 300 °C. В качестве электродов используются электроды из химически инертной платины, наносимой в виде толстого пористого слоя. Напряжение U_λ, создаваемое на электродах, можно рассчитать с помощью уравнения Нернста. Если [Ox] и [Red] заменить на парциальное давление кислорода $p(O_2)$ в контрольной среде (окружающий воздух) и среде отработавших газов, получается следующее соотношение:

$$U_\lambda = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_R(O_2)}{p_A(O_2)}.$$

Здесь $p_A(O_2)$ означает парциальное давление кислорода в отработавших газах, $p_R(O_2)$ – парциальное давление кислорода в контрольной среде, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура и F – постоянная Фарадея.

В районе $\lambda = 1$ колебания напряжения очень велики, что позволяет с успехом регулировать данное значение.

Список литературы

[1] E. Fluck, R.C. Brasted: Allgemeine und Anorganische Chemie, 6th Ed., UTB No. 53, Quelle & Meyer, Гейдельберг, 1987.
[2] C.E. Mortimer, U. Muller: Chemie, 9th Ed.,Thieme, Штутгарт, 2007.
[3] C.H. Hamann, W. Vielstrich: Elektrochemie, 4th Ed., Wiley-VCH, Вайнхайм, 2005.

Математика

Системы чисел

Физические и технические величины описываются их числовыми значениями и единицами измерения. Числа обычно представляются в десятичной системе счисления, т.е. системе с основанием 10. Другими распространенными системами счисления являются двоичная и шестнадцатиричная системы с основанием, соответственно, 2 и 16.

В то время как в десятичной системе используются цифры 0, 1–9, в двоичной системе используются только цифры 0 и 1. В шестнадцатиричной системе в дополнение к цифрам 0, 1–9 используются буквы A, B–F, представляющие числа 10, 11–15 (перевод см. в таблицах 1 и 2, и в [1], [2] и [3]).

Двоичная и шестнадцатиричная системы счисления используются в основном в информационных технологиях, поскольку компьютер может обрабатывать информацию только с помощью двух символов – «0» и «1». Эти два символа и составляют основу двоичной системы. Когда восемь двоичных цифр объединяются в один байт, появляется возможность представлять десятичные числа 0–255, что соответствует шестнадцатиричным числам 0–FF.

Таблица 1. Преобразование десятичных чисел в двоичные

Десятичное число	Двоичное число
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
8	1000
16	10 000
32	100 000
64	1 000 000
128	10 000 000
256	100 000 000

Таблица 2. Преобразование десятичных чисел в шестнадцатиричные

Десятичное число	Шестнадцатиричное число
0, 1–9	0, 1–9
10, 11–15	A, B–F
16	10
17	11
31	1F
32	20
256	100
4096	1000
65 536	10 000

Функции

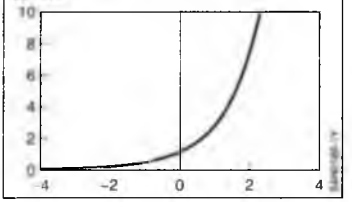
Экспоненциальная функция

Таблица 3. Экспоненциальная функция

Область определения D_f и поведение	*Свойства*
$f(x)=e^x;\ D_f=\mathbb{R}$ $x\to-\infty:\ f(x)\to 0$ $x\to+\infty:\ f(x)\to+\infty$ $f(0)=e^0=1$	$e^a\cdot e^b=e^{a+b}$ $(e^a)^b=e^{ab}$ $\frac{d}{dx}e^x=e^x$

Число Эйлера $e=2{,}71828\ldots$

Рис. 1. График экспоненциальной функции



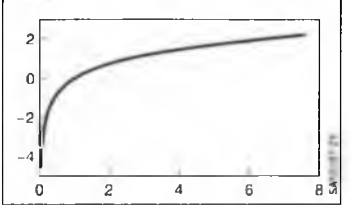
Логарифмическая функция

Логарифмическая функция представляет собой функцию, обратную экспоненциальной функции.

Таблица 4. Логарифмическая функция

Область определения D_f и поведение.	*Свойства:*
$f(x)=\ln x$ $=\log_e(x);\ D_f=\mathbb{R}^+$ $x\to 0:\ f(x)\to-\infty$ $x\to+\infty:\ f(x)\to\infty$ $f(1)=\ln(1)=0$	$\ln(a)+\ln(b)=\ln(a\cdot b)$ $\ln(a)-\ln(b)=\ln(a/b)$ $c\cdot\ln(a)=\ln(a^c)$ $\frac{d}{dx}\ln(x)=\frac{1}{x}$

Рис. 2. График логарифмической функции



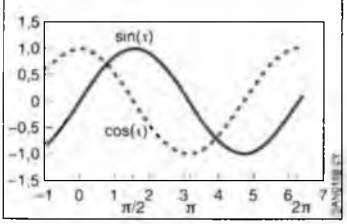
Тригонометрические функции

Синус и косинус

Таблица 5. Функции синуса и косинуса

Области определения D_f, D_g, Области значений W_f, W_g и поведение:	*Свойства*
$f(x)=\sin(x)$; $D_f=\mathbb{R}$	$\sin(x+2\pi)=\sin(x)$
$g(x)=\cos(x)$; $D_g=\mathbb{R}$	$\cos(x+2\pi)=\cos(x)$
$W_f=W_g=[-1;+1]$	$\sin(x\pm\frac{\pi}{2})=\pm\cos(x)$
Период: 2π	$\cos(x\pm\frac{\pi}{2})=\mp\sin(x)$
	$\sin^2(x)+\cos^2(x)=1$

Рис. 3. Графики функций синуса и косинуса

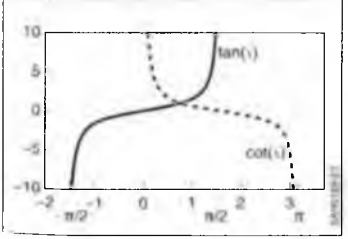


Тангенс и котангенс

Таблица 6. Графики функций тангенса и котангенса

Области определения D_f, D_g, Области значений W_f, W_g и поведение	*Свойства*
$f(x)=\tan(x)=\frac{\sin(x)}{\cos(x)}$	$\tan(x+\pi)=\tan(x)$
$g(x)=\cot(x)=\frac{\cos(x)}{\sin(x)}$	$\cot(x+\pi)=\cot(x)$
$D_f=\mathbb{R}\setminus\{\frac{\pi}{2}+k\,\pi, k\in\mathbb{Z}\}$	$\tan(x\pm\frac{\pi}{2})=-\cot(x)$
$D_g=\mathbb{R}\setminus\{k\,\pi, k\in\mathbb{Z}\}$	$\cot(x\pm\frac{\pi}{2})=-\tan(x)$
$W_f=W_g=\mathbb{R}$	$\cot(x)=\frac{1}{\tan(x)}$
Период: π	

Рис. 4. Графики функций тангенса и котангенса



Многочлены

Многочлен степени n состоит из $(n+1)$ слагаемых с действительными (или комплексными) коэффициентами $a_0, a_1, \ldots, a_n$ и ассоциированными одночленами x^i:

$$f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\ldots+a_nx^n.$$

Многочлен степени n может иметь максимум n нулевых точек и $n-1$ локальных экстремумов.

На рис. 5 в качестве примера показаны прямая линия (многочлен первой степени) и парабола (многочлен второй степени).

Прямая линия

Прямая линия является многочленом первой степени:

$f(x)=a_0+a_1x$ или
$y=mx+t$ (с градиентом m и отрезком t, отсекаемым на оси ординат).

Нулевая точка лежит на $x_0=-\frac{t}{m}$.

Парабола (квадратичная функция)

Парабола представляет собой многочлен 2-ой степени:

$f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2$ или
$y=ax^2+bx+c.$

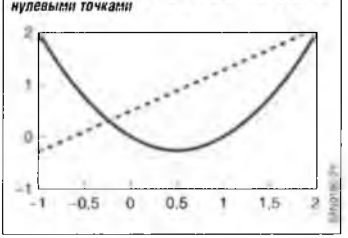
Нулевые точки лежат на

$$x_{1/2}=\frac{1}{2a}\left(-b\pm\sqrt{b^2-4ac}\right)$$

(решение квадратного уравнения).

Парабола может не иметь ни одной нулевой точки, либо иметь одну или две нулевые точки.

Рис. 5. Пример прямой линии и параболы с двумя нулевыми точками



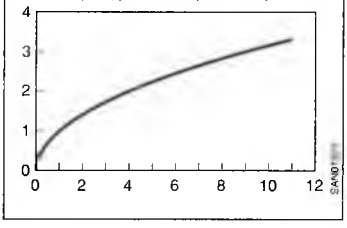
Функция квадратного корня

Функция квадратного корня представляет собой функцию, обратную квадратичной функции.

Таблица 7. Функция квадратного корня

Область определения D_f, область значений W_f и поведение	*Свойства:*
$f(x)=\sqrt{x}=x^{1/2}$	$\sqrt{x}\cdot\sqrt{y}=\sqrt{xy}$
$D_f=\mathbb{R}_0^+$	$\sqrt[n]{x}=(\sqrt{x})^n$
$W_f=\mathbb{R}_0^+$	
$x\to+\infty:\ f(x)\to+\infty$	

Рис. 6. График функции квадратного корня



Аналогично, для каждого одночлена $f(x)=x^n$, $n\in\mathbb{N}$, существует монотонно возрастающая обратная функция $f^{-1}(x)=\sqrt[n]{x}=x^{1/n}$, которая определена только для $x\geq 0$.

Абсолютная величина и знаковая функция

Каждое действительное число x может быть разбито на его знак и абсолютную величину $|x|$. При этом применимо следующее выражение:

$$x=\operatorname{sgn}(x)\cdot|x|$$

Например, $\operatorname{sgn}(-3)=-1$, а $\operatorname{sgn}(+4)=+1$. Абсолютная величина выражает отклонение числа x от точки начала координат 0. Таким образом, функция абсолютной величины может быть представлена как

$$f(x)=|x|=\begin{cases} x & \text{для } x\geq 0 \\ -x & \text{для } x<0 \end{cases}$$

с областью определения $D_f=\mathbb{R}$ и областью значений $W_f=\mathbb{R}_0^+$.
При этом
$f(x)\to+\infty$ для $x\to\pm\infty$.

Уравнения для плоского треугольника

На рис. 7 показан плоский треугольник со сторонами a, b и c и углами α, β и γ. Соотношения между этими величинами описываются следующими уравнениями.

Сумма углов:
$\alpha+\beta+\gamma=180°$.

Теорема синусов:
$a:b:c=\sin\alpha:\sin\beta:\sin\gamma$.

Теорема Пифагора:
$c^2=a^2+b^2-2a\cdot b\cdot\cos\gamma$ (общая),
$c^2=a^2+b^2$ (для прямоугольного треугольника).

Рис. 7. Плоский треугольник
вершины – A, B, C;
длины сторон – a, b, c;
углы – α, β, γ

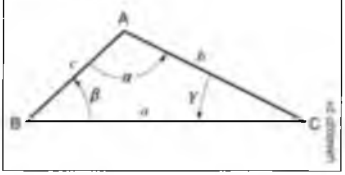
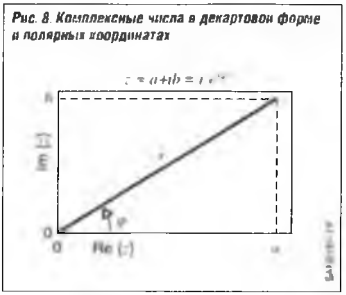


Рис. 8. Комплексные числа в декартовой форме и полярных координатах



Комплексные числа

Комплексное число z имеет действительную и мнимую составляющие. Мнимая составляющая умножена для z на мнимую единицу i. При помощи координат a и b можно представить число z в декартовой системе координат.

Комплексное число z в декартовой системе координат:

$z = a + i \cdot b$ где $i^2 = -1$,

действительная составляющая;

$a = \mathrm{Re}\{z\}$,

мнимая составляющая

$b = \mathrm{Im}\{z\}$.

Декартова форма может быть при помощи простого преобразования переведена в полярные координаты r и φ (отклонение от начала координат и угол к оси x) (см. рис. 8).

Комплексное число z в полярных координатах.

$z = re^{i\varphi}$,

где $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ и $\tan\varphi = \frac{b}{a}$,

или

$a = r \cdot \cos\varphi$ и $b = r \cdot \sin\varphi$.

Комплексная экспоненциальная функция:

$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$.

Правила вычисления:

В отношении комплексных чисел действуют те же правила вычисления, что и в отношении действительных чисел. При этом сложение легче выполнять в декартовых координатах, а умножение – в полярных.

Сложение:

$z_1 + z_2 = (a_1 + a_2) + i(b_1 + b_2)$.

Умножение:

$z_1 \cdot z_2 = (r_1 \cdot r_2)\, e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$.

Список литературы

[1] T. Arens and others: Mathematik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2008

[2] I.N. Bronstein and others: Taschenbuch der Mathematik, 7th Edition, Verlag Harri Deutsch Frankfurt a.M., 2008.

[3] L. Papula: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Volumes 1 to 3, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2008.

Математические знаки и символы

+	плюс
−	минус
· или ×	умножение
: или /	деление
=	равно
≈	приблизительно равно
≠	не равно
<	меньше
>	больше
≤	меньше или равно
≥	больше или равно
~ или ∝	пропорционально
$\sum a_i$	сумма a_i
$\prod a_i$	произведение a_i
$n!$	n факториал (1 2 3 n)
Δ	разность или оператор Лапласа
$\sqrt{\ }$	квадратный корень
||	параллельность
→	стремление
∞	бесконечность
d/dx	дифференцирование по x
$\partial/\partial x$	частное дифференцирование по x
$\int f(x)dx$	интеграл $f(x)$

Греческий алфавит

A	α	Альфа
B	β	Бета
Γ	γ	Гамма
Δ	δ	Дельта
E	ε, ϵ	Эпсилон
Z	ζ	Дзета
H	η	Эта
Θ	θ, ϑ	Тэта
I	ι	Йота
K	$\kappa, \varkappa$	Каппа
Λ	λ	Лямбда
M	μ	Мю
N	ν	Ню
Ξ	ξ	Кси
O	o	Омикрон
Π	π, ϖ	Пи
P	ρ, ϱ	Ро
Σ	σ, ς	Сигма
T	τ	Тау
Y, Υ	υ	Ипсилон
Φ	ϕ, φ	Фи
X	χ	Хи
Ψ	ψ	Пси
ι	ω	Омега

Метод конечных элементов

Применение

Практически все технические процессы могут быть смоделированы на компьютере при помощи метода конечных элементов – FEM (термин был введен Реем У. Клафом в начале 1960-х годов [1]). Этот метод подразумевает разбиение любого тела (газообразного, жидкого или твердого) на элементы простой формы (линия, треугольник, квадрат, тетраэдр, пентаэдр, гексаэдр), размеры которых являются минимально возможными, и которые постоянно связаны друг с другом в своих экстремальных точках («узлах»). Небольшие размеры элементов очень важны, поскольку поведение элементов, описываемое с помощью аппроксимации линейными уравнениями, применимо только к бесконечно малым элементам. Однако время, затрачиваемое на вычисления, требует применения метода конечных элементов. Приближение к реальности тем лучше, чем меньше размеры элементов.

На практике применение метода FEM, также известного как FEA (анализ методом конечных элементов), началось в начале 1960-х годов в авиационной и аэрокосмической отраслях, но очень скоро метод нашел применение в автомобилестроении. Сегодня метод используется во всех областях деятельности, включая прогнозирование погоды, медицину, и многие приложения автомобилестроения, от расчета компонентов двигателя и шасси до прогнозирования поведения кузова при столкновении.

Имеются два различных способа применения FEM. Изначально использовался «черный ящик» FEM, который входил в состав всех программ CAD (компьютеризованного проектирования) и предназначался для грубых расчетов, выполняемых инженером-конструктором (например, при конструировании бампера), но затем применение метода было оставлено за специалистами по прикладным программам FEM (например, предназначенным для расчета кузова, разработки мостов или расчета динамики движения).

Программное обеспечение FEM

В программное обеспечение FEM входят препроцессор, постпроцессор и собственно программы FEM. Создание сети, т.е. разбиение на элементы, в основном, выполняется в препроцессоре на основе геометрии CAD, которая считывается непосредственно или через нейтральные интерфейсы, такие как IGES (исходный стандарт обмена графическими данными), VDA-FS (интерфейс для технических характеристик элементов и точек, установленных союзом немецких автомобилестроителей) или STEP (стандарт по обмену данными моделей изделий). Программа FEM рассчитывает сформулированную таким образом модель вычислений. Полученный результат затем отображается в графической форме в постпроцессоре (например, распределение нагрузок в виде линий одного цвета, показ механических напряжений в форме анимации).

Основные сведения по применению

Подобно всем числовым методам, FEM представляет собой процесс аппроксимации. В механике, основной сфере применения FEM, ограничения, налагаемые на этот метод, описываются следующим образом.

Малые перемещения за один шаг решения

Тела движутся по траекториям, которые обычно являются кривыми высшего порядка. В соответствии с основным принципом линеаризации, эти перемещения ограничиваются прямолинейными траекториями, которые могут быть описаны линейными уравнениями. Будучи перенесенными к экстремальным точкам элементов (узлам), они также перемещаются по прямой линии. Таким образом, узлы способны правильно совершать только очень малые перемещения (узел поворачивается менее чем на 3,5°). Фактическое движение вдоль любой траектории или нелинейное поведение материала описывается, таким образом, линейными перемещениями, шаг за шагом, при большом количестве малых шагов.

Точность вычислений

Система линейных уравнения составляется и решается при ограниченной точности вычислений, производимых компьютером. Обычно для сохраненного в памяти числа используются 8 байтов (= 64 бита) с точностью вычислений до 13 значащих цифр, т.е. только первые 13 цифр числа могут быть представлены точно. Четырнадцатая цифра и все последующие цифры в этом числе являются случайными числами. Таким образом, это исключает возможность каких-либо различий по жесткости отдельных компонентов модели. Например, при расчете деформаций каркаса кузова необходимо при измерениях

деформации кузова, заменить пружины моста жесткими опорами.

Интерпретация результатов

Большая опасность заключается в том факте, что формальная модель вычислений, правильно сформулированная в начале, может создать действительно выразительные цветные изображения, однако демонстрируемые результаты могут концентрироваться вокруг факторов, заслоняющих реальность.

Проблемы, возникающие в результате вышеуказанных ограничений, должны, следовательно, быть идентифицированы и помечены программой вычислений, с тем чтобы менее опытный пользователь также мог легко получать правильные результаты.

Области применения FEM

Физика, с точки зрения приложений в технике, в общем случае подразделяется на пять разделов: механика со статикой и кинематикой (например, кузов, мосты); динамика и акустика (например, шум, создаваемый автомобилем); термодинамика (например, температурный режим в двигателе); электричество и магнетизм (например, катушка зажигания и датчики); оптика (например, фары). Что касается метода FEM, всегда проводится различие между:

- линейными и нелинейными, статическими и динамическими проблемами с деформациями, как неизвестными величинами для вычисления механических напряжений и динамического анализа;
- стационарными (вневременными) и нестационарными (зависящими от времени) потенциальными проблемами (например, температура, звуковое давление, электрический или магнитный потенциал) с потенциалами в качестве неизвестных величин;
- связями различных областей, например, для расчета температурного поля и результирующих деформаций, напряжений и усилий в линейной статике во время пуска двигателя.

Элементы FEM

Свойства элементов определяют наиболее важные рабочие характеристики программы FEM. Качество элемента выражается степенью выбранной функции математического описания. Проводится различие между элементами с линейным и квадратным описанием, которые распознаются по срединным узлам (находящимся в серединах сторон). Таким образом, качество модели вычислений зависит не только от крупности используемой сетки, но также в значительной степени от функции описания.

При этом проводится различие между элементами трех типов – линейными, оболочковыми и объемными.

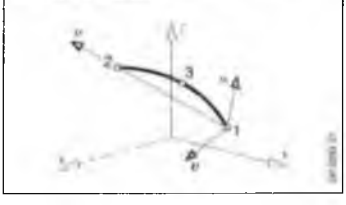
Линейные элементы

Линейные элементы (рис. 1) являются прямыми или кривыми со срединным узлом. Поперечные сечения описываются посредством указания числовых значений площади поперечного сечения A , уменьшенных поперечных сечений среза $A_{red\text{-}v\text{-}w}$ (в областях среза), главных моментов инерции (I_v, I_w), крутящего момента инерции (I_t) с крутящим моментом сопротивления сечения (W_t), момента инерции сектора при кручении, угла α, который описывает положение главных осей инерции v и w по отношению к плоскости дороги, и максимум четырех точек концентрации напряжений (S_v, S_w) для вычисления напряжения изгиба.

Оболочковые элементы

Оболочковые элементы (рис. 2) по форме представляют собой треугольник или четырехугольник – в идеальном случае равносторонний четырехугольник или квадрат, обычно постоянной толщины. Если срединные узлы отсутствуют, края являются прямыми. Ис-

Рис. 1. Линейные элементы
с постоянным или линейно изменяющимся поперечным сечением



пользования треугольников следует по возможности избегать или применять их только в переходных областях.

Объемные (сплошные) элементы

Объемные элементы (рис. 3) имеют форму тетраэдра, пентаэдра и гексаэдра, а в идеальном случае – равностороннего тетраэдра или куба. При достаточном количестве элементов по толщине (больше или равно трем) срединные элементы в настоящее время не используются. Однако, это не относится к тетраэдрам, которые почти всегда применяются в случае сложной геометрии деталей, таких как головка блока цилиндров.

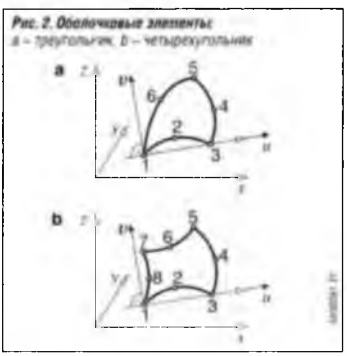


Рис. 2. Оболочковые элементы:
a – треугольник, b – четырехугольник

Моделирование и оценка результатов

Наиболее важной функцией при использовании программы FEM является задача создания исходных данных в качестве модели вычислений с использованием препроцессора. На эту задачу обычно уходит много времени. Пользователь должен стремиться достигнуть этой цели как можно меньшим количеством элементов и узлов (однако, следует иметь в виду, что модель расчета, например, кузова может иметь примерно от трех до четырех миллионов узлов). Для этого пользователю следует обладать определенным опытом, а также он должен точно знать параметры используемых элементов (см. ниже примеры FEM). Они могут несколько различаться в каждой программе FEM.

Первый шаг в процессе моделирования заключается в выборе типа элемента (линейного, оболочкового или объемного) и определении шага сетки, например, при помощи указанного расстояния от середины элемента до края. Следующий шаг заключается в определении свойств (данных материала), например, толщины элемента для оболочковых элементов, значений площади поперечного сечения для линейных элементов и используемых единиц измерения (например, длина – в мм, усилие – в Н). Следующий шаг заключается в определении структуры опор и нагрузок. Решающим фактором в этом случае является рассмотрение точек, в которых модель зафиксирована и нагружена. В отношении нагрузок также полезно выполнить разбиение общей нагрузки на расчетные, например, на нагрузку, вызванную силой тяжести, и нагрузки, возникающие во время движения.

Все результаты FEM доступны в форме перечня или в формате данных постпроцессора и, следовательно, могут быть показаны в виде графика (см. примеры FEM). В этом смысле постпроцессор предлагает все возможные формы отображения результатов.

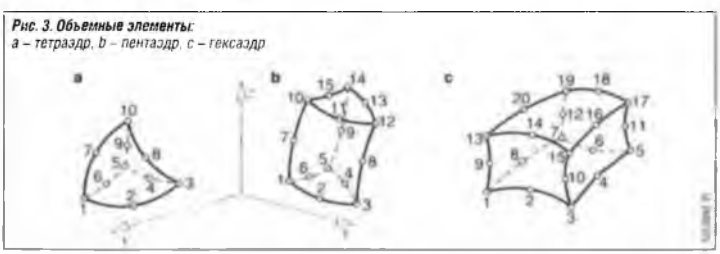


Рис. 3. Объемные элементы:
a – тетраэдр, b – пентаэдр, c – гексаэдр

Примеры FEM

В качестве примера приведем моделирование, выполненное на основе геометрии CAD с использованием программы FEM TP 2000. Исходные данные для модели вместе с представлением результатов в цвете можно также найти на странице интернета, указанной в [2].

В действительности все тела являются трехмерными. При моделировании, для экономии времени и средств, часто выбирается упрощенное решение. Например, намного легче выполнить автоматическое сеточное разбиение плоской поверхности в оболочковых элементах, чем представлять тело в виде его объемных элементов. Часто используемая сетка тетраэдров, которую в настоящее время создает каждый препроцессор для любой объемной геометрии, не всегда оправдывает ожидания.

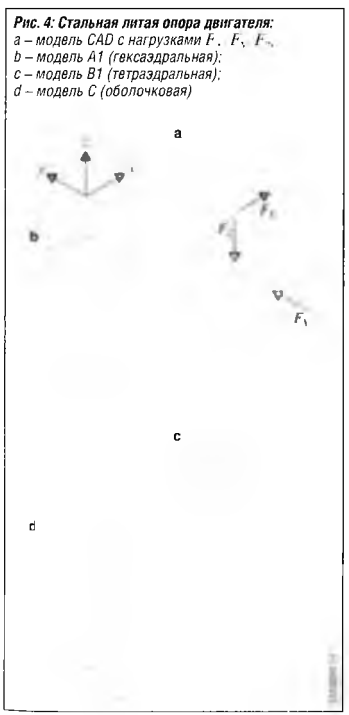


Рис. 4: Стальная литая опора двигателя:
a – модель CAD с нагрузками F_x, F_y, F_z;
b – модель A1 (гексаэдральная);
c – модель B1 (тетраэдральная);
d – модель C (оболочковая)

В автомобилестроении структурные компоненты являются либо толстостенными и сплошными (например, двигатель, трансмиссия, мосты, колеса) и моделируются при помощи объемных элементов, либо они изготавливаются из тонкого листового металла (например, кузов автомобиля или кабина грузовика) и моделируются с использованием оболочковых и линейных элементов.

В первом примере модель на основе объемных элементов относится к первой группе толстостенных сплошных компонентов. Эта модель сравнивается с моделью, используемой, в основном, на основе оболочковых элементов, и принадлежащей ко второй группе. Эта модель также включает линейные элементы, часто применяемые в автомобилестроении, – они приведены во втором примере.

Пример 1: литая стальная опора двигателя как модель на основе оболочковых и объемных элементов (линейная статика)

Целью является сравнение оболочковых и объемных элементов в линейной статике на относительно толстостенной (3,75 мм) литой стальной опоре двигателя (50 × 25 × 57 мм^3). Приведено сравнение двух моделей на основе объемных элементов A и B (каждая со срединными узлами и без них), результаты которых значительно различаются. В дополнение к этому показана модель C на основе оболочковых элементов (рис. 4). Начиная с объемной геометрии CAD препроцессор автоматически создает сети объемных элементов A и B, а также модель C на основе оболочковых элементов при помощи модели поверхности.

Приняты следующие свойства материала:
модуль упругости (модуль Юнга) – 210 000 Н/мм^2;
коэффициент Пуассона – 0,3;
плотность – 0,00000785 кг/мм^3.

Для моделей A и B свойства элементов определяются типом элемента «сплошной» (объемный) с тремя степенями свободы узлов v_x, v_y и v_z. Для модели C свойства определяются типом элемента «пластина» (оболочковый элемент) с шестью степенями свободы узлов v_x, v_y, v_z, d_x, d_y, d_z и постоянной толщиной d = 3,75 мм.

В модели A сеточное разбиение на объемные элементы (сплошная сетка) демонстрирует предпочтительное разбиение на гексаэдры (полностью автоматический процесс возможен не для любой геометрии, поскольку здесь, например, геометрическая

форма сначала должна быть разбита на базовые тела), а на модели В – автоматическое разбиение на тетраэдры. Указано также количество элементов относительно толщины, что определяет точность (в этом случае, как минимум, используются три элемента).

Условия опор

На прямоугольной плоскости xz равенство $v_y = 0$ относится ко всем узлам. Все краевые узлы на правой, длинной стойке зафиксированы при $v_x = 0$, а узлы нижней, короткой стойки – при $v_z = 0$.

Нагрузки

$\sum F_x = 900$ Н, $\sum F_y = 2006$ Н, $\sum F_z = -550$ Н. Все нагрузки определены как поверхностные («на поверхности», для оболочковых элементов – «на кривой») около углубления при $F_x = 600$ Н, у малого отверстия – при $F_y = 2006$ Н и у большого отверстия – при $F_z = -550$ Н

Примечание: применение «изолированных» отдельных нагрузок допускается только при использовании линейных элементов.

Результат

Результаты приведены в табл. 1. На рис. 5 показаны результаты для модели А. Напряжения отображаются оттенками серого цвета (критические области затемнены) или, в оригинале, как области одинакового цвета.

Объемные элементы очень чувствительны к неправильно апроксимированным распределениям нагрузок. Следовательно, объемные элементы должны всегда испытывать только поверхностные нагрузки.

Детальное рассмотрение табл. 1: правильные результаты дает модель А2 с узлами в серединах сторон ($v = 0{,}064$ мм, $\sigma = 195$ МПа). Отклонение между средним и максимальным напряжениями в узле (со стороны всех

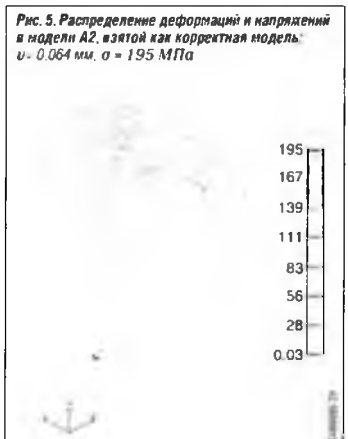


Рис. 5. Распределение деформаций и напряжений в модели А2, взятой как корректная модель: v = 0.064 мм, σ = 195 МПа

элементов, примыкающих к одному узлу) должно быть как можно меньшим (менее 15%). На модели А1, при трех элементах на толщину материала, достигнуто значение отклонения 11%.

На модели В1, при наличии трех тетраэдров на толщину материала, деформация составляет 25% (слишком мала) ($v = 0{,}048$ мм), а максимальное напряжение также составляет 25%. Только при двух тетраэдрах на толщину материала модель была даже на 58% более жесткой, и вряд ли могла бы использоваться, соответственно, при более низких напряжениях. Однако, при наличии срединных узлов (В2) она дает деформации и напряжения, практически идентичные модели А2 с очень большим количеством узлов и большой продолжительностью вы-

Таблица 1. Результаты моделирования опоры двигателя
Значения в скобках относятся к элементам со срединными узлами

Модель	Тип элемента	Количество узлов	Масса в кг	Максимальная деформация в мм	Среднее напряжение в МПа	Максимальное напряжение в МПа	Погрешность напряжения в %, максимум	Время вычисления в секундах
A1 (A2)	Сплошной гексаэдр	4,000 (15,000)	0,119	0,061 (0,064)	145 (185)	164 (195)	15 (0)	10 (110)
B1 (B2)	Сплошной тетраэдр	10,000 (70,000)	0,119	0,048 (0,064)	115 (173)	146 (209)	30 (6)	60 (2400)
C	Прямоугольная оболочка	766	0,114	0,081	197	223	14	2

числений. Следовательно, рекомендуется соблюдать осторожность при использовании тетраэдральных сеток без срединных узлов.
Модель С с оболочковыми элементами без деформации сдвига (предназначенная только для тонкостенных структур) является слишком мягкой (v = 0,081 мм, на 21% больше, в то время как для толстостенных компонентов с учетом деформации сдвига это значение еще больше – на 30%). Оболочковые элементы, тонкостенные или толстостенные, дают значения деформаций, которые могут быть использованы только частично, при относительно большой толщине, в особенности в случае очень компактных тел, что имеет место и в данном примере. Однако при напряжениях +14% их использование по большей части безопасно.

Пример 2: трубчатый каркас кузова

Целью является выполнение анализа методом конечных элементов кузова в виде объемного каркаса без листовой обшивки, включая оптимизацию веса и жесткости, на примере мини-пикапа (не реальный автомобиль).
Свойства материала:
модуль упругости (модуль Юнга) – 200 000 Н/мм^2;
коэффициент Пуассона – 0,3;
плотность – 0,00000785 кг/мм^3.

В целях упрощения в качестве профильных секций используются только две формы (см. рис. 6). Секция из профиля коробчатого сечения (90 × 120 × 1,5 мм^3) и секция трубчатого профиля (70 × 2 мм^2), которые определены в препроцессоре со своей формой непосредственно как элементы типа «стержень») с постоянным поперечным сечением (элементы с различными начальным и конечным сечениями определялись бы как «балка»). Это



Рис. 6. Профильные секции объемного каркаса: a – секция коробчатого типа, b – трубчатая секция

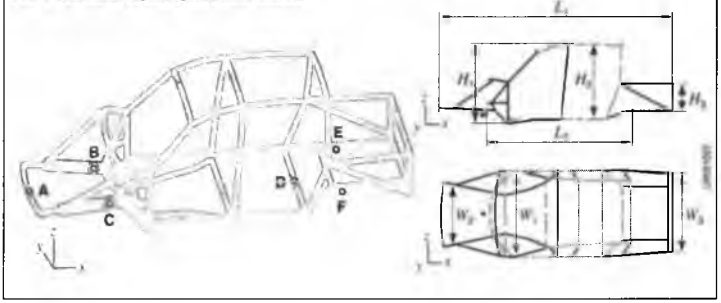
дает следующие требуемые значения сечения (в м^2, мм^4 и мм^3).
Коробчатый/трубчатый профиль (рис. 6):
- площадь поперечного сечения:
  A = 621/427;
- уменьшенные поперечные сечения (в области сдвига):
  A_{redI} = 325/227;
  A_{redII} = 219/227;
- главные моменты инерции:
  I_I = 1 348 306/247 168;
  I_{II} = 869 596/247 168;
- момент инерции при кручении:
  I_t = 1 606 083/494 261;
- крутящий момент сопротивления сечения:
  W_t = 7334/2177;
- расположение главных осей инерции по отношению к дороге:
  α = 0°;
- максимум четыре точки концентрации напряжений:
  S_x = −45/45/45/−45 / 0/35/0/−35;
  S_y = −60/−60/60/60 / −35/0/35/0.

Основные размеры в мм в соответствии с видами сбоку и сверху (рис. 7):
L_1 = 4 114 (максимум);
L_2 = 2 650;
W_1 = 1 517 (максимум);
W_2 = 1 147 (спереди);
W_3 = 1 374 (сзади);
H_1 = 1 402 (макс.);
H_2 = 1 315;
H_3 = 469 (коробчатый профиль)

Конструкция
Объемный каркас состоит из 18 компонентов (рис. 8):
2 – боковая стойка;
3 – поперечная опора педалей;
7 – поперечная опора кабины;
8 – передняя боковая стойка;
10 – передняя вспомогательная поперечная стойка;
14 – боковой каркас крыши;
15 – поперечный каркас крыши;
16 – задний подрамник;
17 – боковая стойка коробчатого сечения ,
19 – задний бампер.

Условия опор:
Линейная статика, вид нагрузки – изгиб (не показан):
A – v_y = 0; (A. .F, см. рис. 7);
B, C, E, F – v_z = 0; D – v_x = 0, v_y = 0

Рис. 7. Объемный каркас кузова мини-пикапа



Линейная статика, вид нагрузки – кручение:
A, B, C – свободные;
E, F – $v_z = 0$;
D – $v_x = 0$, $v_y = 0$, $d_y = 0$, $d_z = 0$.

Степени свободы/динамика в свободном состоянии:
без опор, кузов свободно вибрирует на пружинах.

Напряжения
Линейная статика, вид нагрузки – кручение:
крутящий момент – 3 000 000 Н·мм, при нормальной удельной нагрузке на
опоры переднего моста B: F = –3 593,7 Н;
опоры переднего моста C: F = 3 593,7 Н.

Степени свободы/динамика в свободном состоянии:
только массы, на которые действует сила тяжести 170 кг, без дополнительных масс.

Результаты
Степени свободы/динамика в свободном состоянии:
– кузов может свободно вибрировать на своих пружинах, значения собственных частот недемпфированной, упругой системы в восходящем порядке; для свободных колебаний, начиная с нескольких типов колебаний (в данном случае – от 1 до 6) с собственной частотой 0 в каждом случае.
– первая собственная частота (38 Гц) как частота первых крутильных колебаний, третья собственная частота (48 Гц) как частота первых изгибных колебаний; с нормализованными деформациями в каждом случае x, y, z во всех узлах (в данном случае деформации нормализованы максимум до 0,1 мм), нормализованными напряжениями во всех элементах, и энергия напряжений, являющаяся важным параметром для оптимизации веса на один элемент и один компонент, от 1 до 18 % в виде гистограммы (как показано для случая линейной статики на рис. 8). Абсолютные величины были получены только в случае расчета возбуждения.

Линейная статика:
– деформации x, y, z во всех узлах;
– силы и моменты реакции, действующие на все элементы, энергия напряжений, приходящаяся на элемент и компонент в %.

Оптимизация веса и жесткости
Формула вычислений для оптимизации веса и жесткости известна, начиная с 1960-х годов (максимальная погрешность для двойной жесткости – 10 %). Изменение жесткости всей конструкции (в %) получено посредством умножения изменения жесткости компонента на долю энергии напряжений для компонента и деления результата на 100.

Эта формула используется специально в целях оптимизации практически во всех критичных для автомобиля случаях нагрузки при кручении с учетом других видов нагрузки. Таким образом, конструкция может быть усилена при помощи стоек, воспринимающих основную часть нагрузки, а вес может быть снижен за счет стоек, воспринимающих меньшую часть нагрузки.

Применение формулы

Первый компонент (см. рис. 8):
компонент 15 (каркас крыши, поперечный, G =11,85 кг с долей энергии напряжений 14,57 %) дает изменение (уменьшение) момента кручения между мостами (14,57 × 116) / 100 = 16,9 %, когда жесткость (момент инерции относительно плоскости) этого компонента увеличивается в 2,169 раза (на 116,9 %). В этом случае при увеличении диаметра трубы с 70 до 90 мм возрастание массы составляет 3,55 кг.

Второй компонент (см. рис. 8):
компонент 6 (линейный усилительный элемент, G = 11,14 кг с долей энергии напряжений 2,64 %) дает изменение (2,64 × 250)/100 = 6,6 % (т.е. очень небольшое снижение момента кручения между мостами, когда жесткость (момент инерции) этого компонента уменьшается в 3,5 раза (на 250 %). В этом случае при уменьшении диаметра трубы с 70 до 50 мм снижение массы составляет 3,34 кг.

Результат

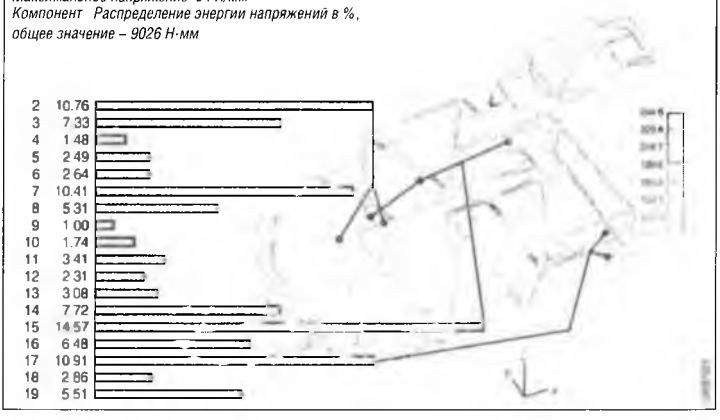
Минимальное увеличение массы на 3,55 – 3,34 = 0,21 кг дает увеличение жесткости при кручении на 16,9 – 6,6 = 10,3 % (проверка при измененных профильных секциях дает значение 9 %; это объясняется малым значением погрешности формулы вычислений).

Диаграммы распределения энергии напряжений для других случаев нагрузки (здесь не показаны) показывают, что это также относится к крутильным колебаниям и не имеет значения для изгиба. Таким образом, можно значительно повысить для этого кузова жесткость при кручении и жесткость на изгиб и безопасно снизить общую массу посредством уменьшения поперечных сечений компонентов, имеющих избыточные размеры.

Список литературы

[1] R.W. Clough: The Finite Element Method In Plane Stress Analysis; Publication, 2nd ASCE Conference on Electronic Computation,1960.
[2] www.IGFgrothTP2000.de.

Рис. 8. Вид нагрузки - кручение: 3 000 000 Н·мм в точках крепления переднего моста A и B
Максимальная деформация в мм:
направление x – 0,868459; направление y – 3,071005; направление z – 3,688961.
Максимальное напряжение 64 Н/мм²
Компонент Распределение энергии напряжений в %,
общее значение – 9026 Н·мм



Техника автоматического регулирования

Термины и определения

(в соответствии с DIN 19226 [1])

Управление с обратной связью

В технологическом процессе функцией системы управления с обратной связью является поддержание определенного физического параметра (управляемой переменной y) в соответствии с заданным значением. При этом значение управляемой переменной непрерывно измеряется и сравнивается с заданным значением (опорной переменной w, например, при установке напряжения генератора в функции степени заряда аккумулятора) (см. рис. 1). В случае отклонения производится соответствующее управление корректирующей переменной u (например, изменение тока возбуждения генератора) таким образом, чтобы управляемая переменная y снова вернулась к заданному значению. Этот процесс имеет место в системе управления с замкнутым контуром (с обратной связью). Отклонения могут возникать под действием возмущений z (например, включения дополнительных электрических потребителей), воздействующих на управляемую систему и влияющих на управляемую переменную y неблагоприятным образом ([2], [3] и [4]).

Рис. 1. Базовая структура системы управления: *y – управляемая переменная; w – опорная переменная; u – переменное воздействие; z – возмущение*

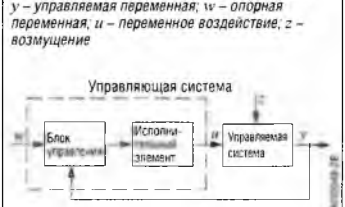
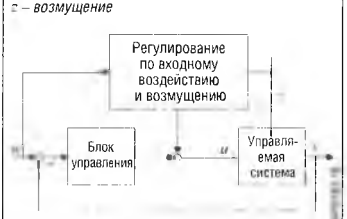


Рис. 2. Система регулирования с разомкнутым контуром (с регулированием по входному воздействию и возмущению): *y – управляемая переменная, w – опорная переменная, u – переменное воздействие, z – возмущение*



Процессы управления с обратной связью осуществляются в автомобиле в самых различных системах. В качестве примера можно привести регулирование температуры охлаждающей жидкости двигателя, управление кондиционером и многие другие операции регулирования и управления двигателем (контроль детонации, контроль значения λ), трансмиссией (управление сцеплением) и шасси (контроль рыскания).

Системы управления без обратной связи

Довольно часто используются также системы регулирования и управления без обратной связи (с разомкнутым контуром). В этом случае замкнутая система управления заменяется на разомкнутую. Этот процесс возможен только в том случае, если поведение управляемой системы точно известно, и на нее не воздействуют никакие (не поддающиеся измерению) возмущения z.

Управление с обратной связью является предпочтительным, поскольку при этом со стабильностью управляемой величины не возникает проблем, связанных с отсутствием обратной связи. Поскольку вышеупомянутые условия на практике имеют место весьма редко, использование систем с обратной связью в большинстве случаев является неизбежным.

Комбинация замкнутых (с обратной связью) и разомкнутых (без обратной связи) контуров управления

На практике, с целью использования преимуществ обеих структур, часто осуществляется комбинирование замкнутых и разомкнутых контуров управления. При этом установленные связи между опорной переменной, возмущением, корректирующей переменной и управляемой переменной используются в максимальной степени с целью реализации системы управления с разомкнутым контуром. Отклонения, которые, тем не менее, возникают вследствие изменения параметров или под действием не поддающихся измерению возмущений, корректируются замкнутым контуром управления (см. рис. 2).

Каскадное управление

Часто имеют место структуры, в которых управляемая система разделена на две или более подсистем (например, на фактический процесс и соответствующий исполнительный механизм). В соответствии с этим разделением существуют один или более внутренних блоков управления и один внешний блок управления, которые спроектированы и работают раздельно. Эта процедура известна под названием каскадного управления (см. рис. 3).

Проектирование блоков управления (контроллеров) упрощается за счет разделения задачи управления на несколько поддающихся управлению подзадач. Имеют место дополнительные преимущества в отношении динамической характеристики системы, связанные с тем, что возмущения, действующие во внутреннем контуре управления, корректируются там до того, как они начинают влиять на внешний контур управления. Это ускоряет весь процесс управления. Кроме того, это позволяет линеаризовать нелинейные характеристические кривые внутреннего контура.

Каскадное управление применяется во многих автомобильных системах регулирования, например, в системах регулирования электрического тока электрогидравлических исполнительных механизмов или в системах позиционирования исполнительных механизмов с электроприводом.

Техника автоматического управления, элементы передачи

В отношении рабочих характеристик система управления должна отвечать четырем основным требованиям:

- система управления должна быть стабильной;
- система управления должна демонстрировать требуемую стационарную точность;
- реакция на скачкообразное изменение опорной переменной должна в достаточной степени демпфироваться;
- система управления должна обладать достаточным быстродействием.

Для того чтобы выполнить эти частично противоречащие друг другу требования, сначала

Рис. 3. Система каскадного регулирования: *y_1, y_2 – регулируемые переменные; w_1, w_2 – опорные переменные, u – переменное воздействие*

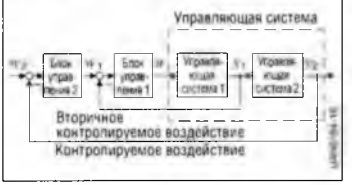
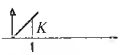
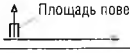
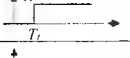
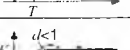


Таблица 1. Краткие сведения о некоторых важных элементах передачи

Элемент передачи	Дифференциальное уравнение (u – вход, y – выход)	Функция преобразования	Отклик
Элемент P	$y = Ku$	K	
Элемент I	$y = K\int_0^T u(\tau)\,d\tau$	$\frac{K}{s}$	
Элемент D	$y = K\dot{u}$	Ks	
Элемент задержки	$y(t) = Ku(t - T_t)$	$Ke^{-T_t s}$	
Элемент P-T_1	$Ty + y = Ku$	$\frac{K}{1+Ts}$	
Элемент P-T_2	$T^2y + 2dTy + y = Ku$	$\frac{K}{1+2dTs+T^2s^2}$	

необходимо описать статические и динамические реакции элементов системы управления (самой регулируемой системы и блока управления) с использованием подходящих методов, чтобы иметь возможность проанализировать реакции системы управления и спроектировать блок управления в соответствии с заданными требованиями. Это описание может быть выполнено во временном диапазоне (например, при помощи дифференциальных уравнений) или в определенной полосе частот (например, с использованием функции преобразования или диаграммы Боде).

Многие элементы передачи систем управления можно отнести к конкретным базовым типам, или они могут быть описаны посредством их связей (см. табл. 1).

Задачей синтеза системы управления является разработка для данной регулируемой системы соответствующего блока управления (структуры и параметров элемента передачи), который отвечает вышеуказанным требованиям. Для этой цели существует ряд процедур (например, динамическая коррекция в диаграмме Боде, метод корневого годографа, детализация полюсов, регулятор Риккати в пространстве состояний [4]), которые индивидуально дополняются теми или иными конкретными функциями или шагами проектирования.

Описанная ниже систематизированная процедура показала свою полезность на практике.

Разработка задачи управления

Задача управления

Как правило, задача управления не формулируется специально как таковая, но должна быть выработана на основании требований, предъявляемых к конкретному техническому процессу. Это подразумевает определение задач управления с использованием замкнутых и разомкнутых систем с целью решения вопросов, касающихся того, что должно быть достигнуто при помощи функции управления, и с применением каких переменных будет описываться цель управления. В качестве примера можно привести контролируемое переключение передач типа потребность-реакция в автоматической трансмиссии. С помощью этой функции давление переключающей муфты должно быть во время переключения передачи приведено в соответствие с градиентом скорости таким образом, чтобы время проскальзывания оставалось постоянным при любых условиях работы, даже при изменении тех или иных параметров (например, коэффициента трения).

Система управления и блок-схемы

С учетом этих рассуждений полезно построить диаграмму системы, в которой будут ясно видны основные взаимодействия между электронными, механическими, гидравлическими и пневматическими элементами и всеми датчиками, исполнительными механизмами и системами шин. На основании этой диаграммы можно построить блок схему системы управления, на которой, в свою очередь, будут видны взаимодействия всех функций управления с обратной связью и без обратной связи с регулируемой системой. Функции описываются в форме заголовков, но пока что детально не формулируются.

Рис. 4. Блок-схема системы автоматического управления, например, контролируемым переключением передач типа потребность-реакция в автоматической трансмиссии



При помощи этой диаграммы и блок-схемы можно достичь фундаментального системного понимания оперативных связей в системе. Пока система (механическая часть, периферийные устройства, аппаратура и т.д.) находится на стадии разработки, должна предоставляться возможность оказывать влияние на структурное проектирование системы с использованием общего мехатронного подхода. В качестве примера можно привести процесс заполнения жидкостью рабочего цилиндра гидропривода выключения сцепления. Система должна быть разработана таким образом, чтобы на основе поперечных сечений, объемов и уплотнений было обеспечено ее воспроизводимое поведение при как можно меньшем времени запаздывания.

Регулируемая система

Затем выполняется идентификация регулируемой системы. Это может быть сделано теоретически (посредством моделирования) или практически, например, путем измерения реакции на ступенчатое воздействие или определения частотной характеристики. Рекомендуется использовать оба метода и выполнить соответствующую коррекцию. Идентификация системы представляет собой всеобъемлющий процесс, зависящий от поставленной задачи. Иногда бывает достаточно определить только базовый тип и порядок регулируемой системы.

Разработка блока управления

Блок управления (контроллер) разрабатывается на основе результатов идентификации системы – это главная задача проектирования управляющего устройства. Сначала рекомендуется проработать его теоретически и с использованием методов моделирования. На этом этапе следует определить параметры блока управления. Когда этот этап будет в достаточной степени проработан, следует перейти к испытаниям на реальной регулируемой системе – на стенде или на автомобиле. Обычно в целях достижения дальнейшей оптимизации периодически выполняются рекурсивные шаги.

Критерии проектирования

В дополнение к этой фундаментальной последовательности действий следует учитывать следующие дополнительные критерии.

Цифровое (дискретное) управление

Большинство операций управления на автомобиле осуществляется с использованием микропроцессоров. В этом случае необходимо надлежащим образом определить время выборки, исходя из динамической характеристики системы. При этом необходимо обеспечить условия для того, чтобы все алгоритмы функций могли быть вычислены в течение времени, которое имеется между двумя выборками.

Нелинейность

Во многих случаях простых линейных методов, описанных выше, оказывается недостаточно, поскольку реальные регулируемые системы содержат нелинейные элементы (например, нелинейными являются характеристики регуляторов давления, сцепления и т.д.). В простых случаях, связанных со статическими, непрерывными нелинейностями, они могут быть скомпенсированы посредством дополнительного инвертирующего элемента передачи. В случаях операций регулирования с малыми амплитудами сигнала относительно рабочей точки уравнения, описывающие работу системы могут быть линеаризованы в области этой точки. В противном случае требуется применение более сложных процедур.

Структурные переключения

Многие операции управления с замкнутым контуром сначала инициируются сигналами в разомкнутом контуре управления (например, сначала следует заполнить привод сцепления гидравлической жидкостью, затем подать переключающее давление, затем запустить последовательность переключения передачи). В этом случае при переключении с управления с разомкнутым контуром на управление с замкнутым контуром необходимо обеспечить, чтобы это переключение происходило плавно, и запоминающие устройства (интеграторы элементов *I*) правильно инициализировались.

Робастность

Система управления, как правило, разрабатывается для «номинальной» регулируемой системы. Однако на практике, в связи с наличием допусков изготовления, реальные регулируемые системы демонстрируют отклонения от номинала. Кроме того, в процессе эксплуатации происходит изменение параметров регулируемой системы, например, вследствие износа диска сцепления или в зависимости от величины других переменных (температуры). Ни в каком из этих случаев не должно иметь место значительное ухудшение качества или стабильности системы управления. Для обеспечения выполнения этих требований существуют процедуры, относящиеся к областям «робастного» или «адаптивного» управления

Адаптивные блоки управления

Мотивация

Поведение регулируемых систем часто бывает непостоянным. Во многих случаях происходит изменение таких параметров, как постоянные времени и коэффициенты усиления. Может изменяться даже структура системы. Адаптивное регулирование позволяет привести процессы управления с замкнутым и разомкнутым контурами в соответствие с изменяющимся поведением системы. Примеры:

Допуски изготовления

Не все изделия из одной партии на 100% идентичны. Поскольку индивидуальная настройка сложна, система должна автоматически адаптироваться к различным параметрам (например, см. данные для регулировки автоматической трансмиссии [5]).

Износ

Изменение параметров вследствие износа происходит на воспроизводимом (например, увеличение рабочего хода сцепления) или случайном (например, изменение коэффициента трения дисков) уровне. Адаптация позволяет компенсировать эти изменения (например, адаптация к изменениям рабочего хода для автоматических сцеплений, [6]).

Зависимость от третьей переменной (например, температуры)

Вязкость рабочих жидкостей сильно зависит от температуры. Поскольку эти колебания могут иметь краткосрочный характер (например, повторяться каждый день), они должны быть скомпенсированы (например, при управлении блокировочной муфтой гидротрансформатора), [7], [8]).

Зависимость от рабочей точки

Нелинейные системы часто линеаризуются в области рабочей точки, а затем управление осуществляется линейным контроллером (поведение системы при малой амплитуде сигнала). Адаптация дает возможность учитывать различия в поведении системы в области рабочей точки (например, адаптация давления при чередующихся переключениях передач, производимых автоматической трансмиссией, [9]).

Различные требования к решению этих проблем на уровне регулирования с замкнутым контуром вызывают потребность в адаптивных системах, описание и определение которых приведено ниже.

Определение адаптивного управления

Поведение системы управления адаптируется к изменениям свойств регулируемой системы и ее сигналов. Процедура адаптации, как правило, разделяется на два этапа:

- идентификация изменений поведения системы (параметров) во времени;
- адаптация закона регулирования с замкнутым или разомкнутым контуром, как реакция на изменение поведения системы.

Адаптация системы управления без обратной связи

Адаптация осуществляется системой управления с разомкнутым контуром, обращенной

Рис. 5. Адаптивная система управления без обратной связи:
y – управляемая переменная, w – опорная переменная; u – переменное воздействие; z – возмущение



Рис. 6. Адаптивная система управления с обратной связью:
y – управляемая переменная, w – опорная переменная; u – переменное воздействие



к регулируемой системе в прямом направлении. При этом предполагается, что изменение свойств системы может быть зарегистрировано при помощи измерения внешних сигналов z (возмущений), и что зависимость поведения системы управления от этих сигналов известна (см. рис. 5). Обратная связь с использованием внутренних сигналов контура регулирования для настройки блока управления отсутствует.

Адаптация системы управления с обратной связью

В случае адаптации с обратной связью изменение свойств системы не может быть прямо зарегистрировано, и должно быть идентифицировано при помощи поддающихся измерению сигналов системы управления. Процесс идентификации может представлять собой простое измерение или иметь более сложный алгоритм оценки моделей динамических процессов. В дополнение к основному контуру управления, в соответствии с законом адаптации, реализуется второй контур обратной связи (см. рис. 6).

Как правило, первоначально рекомендуется выполнить адаптацию с разомкнутым контуром, т.е. для адаптации используются известные и метрологически регистрируемые взаимосвязи. Преимущества этой прямонаправленной структуры можно сравнить с преимуществами системы управления без обратной связи по сравнению с системой управления с обратной связью. Контур обратной связи, который может вызывать проблемы с устойчивостью системы, в первом случае отсутствует. На практике, в промышленном применении в основном используются адаптивные системы без обратной связи.

Замечания по проектированию

Перед тем как приступить к проектированию системы адаптивного регулирования, следует прояснить следующие вопросы:

- Какие параметры и функции необходимо адаптировать в связи с тем, что они не могут быть охвачены робастной конструкцией?
- При помощи каких сигналов или переменных эти параметры и функции могут быть определены?
- Должна ли система для определения этих параметров и функций быть специально возбуждена, или адаптация может осуществляться в процессе текущего регулирования?
- Может ли адаптация быть выполнена с использованием системы с разомкнутым контуром или должна быть предусмотрена обратная связь?
- Каким образом можно проверить устойчивость и сходимость системы адаптивного управления?

Детальную проработку таких направлений, как разработка операций адаптивного регулирования и идентификация динамических процессов, можно найти в [4], [10] и [11].

Список литературы

[1] DIN 19226, Control technology, Beuth Verlag, Berlin.

[2] Oppelt, Winfried: Kleines Handbuch technischer Regelvorgange 5th Edition 1972, Verlag Chemie GmbH, Weinheim.

[3] Follinger, Otto: Regelungstechnik, 3rd Edition 1979, AEG-Telefunken, Frankfurt.

[4] Isermann, Rolf. Digitale Regelsysteme, 2nd Edition 1987, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.

[5] DE 102 007 040 485 A1. Abgleichdaten AT-Getriebe.

[6] DE 102 007 027 702 A1, Kupplungsweg-Adaption fur automatisierte Kupplungen.

[7] DE 000 019 943 334 A1, Stormomentbeobachter, Wandlerkupplungsregelung.

[8] Bauer, Gunther; Schwemer, Christian: Entwurf einer Wandlerkupplungsregelung unter Berucksichtigung nichtfunktionaler Anforderungen, AUTOREG 2008, 4th Symposium Baden-Baden, 12 and 13 February 2008, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik.

[9] DE102 006 001899 A1, Adaption Schaltdruck bei verschachtelten Mehrfachschaltungen AT- Getriebe.

[10] Isermann, Rolf: Identifikation dynamischer Systeme I, II, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

[11] Isermann, Rolf: Mechatronische Systeme, 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2007.

Химические элементы

Обозначение

Название по указаниям Совета IUPAC	Русское название	Символ	Состояние[1]	Атомный номер	Атомная масса	Валентность	Год открытия элемента	Автор открытия элемента
Actinium	Актиний	Ac	м	89	227	3	1899	Дебьерн
Aluminum	Алюминий	Al	м	13	26,9815	3	1825	Эрстед
Americium[2]	Америций[2]	Am	м	95	243	2; 3; 4; 5; 6	1944	Сиборг и др.
Antimony	Сурьма	Sb	м	51	121,760	3, 5	в древн.	–
Argon	Аргон	Ar	г	18	39,948	0	1894	Рамзай, Рэлей
Arsenic	Мышьяк	As	н	33	74,9216	3; 5	С13	Магнус
Astatine	Астат	At	н	85	210	1; 3	1940	Корсон, Маккензи, Сегре
Barium	Барий	Ba	м	56	137,327	2	1808	Дэви
Berkelium[2]	Берклий[2]	Bk	м	97	247	3; 4	1949	Сиборг и др.
Beryllium	Бериллий	Be	м	4	9,0122	2	1797	Воклен
Bismuth	Висмут	Bi	м	83	208,9804	1; 3; 5	С15	неизвестен
Bohrium[2]	Борий[2]	Bh	м[3]	107	264	–[4]	1981	Армбрустер, Мюнзенберг и др.
Boron	Бор	B	н	5	10,811	3	1808	Гей-Люссак, Тенар,
Bromine	Бром	Br	н	35	79,904	1; 3; 4; 5 7	1826	Дэви Баляр
Cadmium	Кадмий	Cd	м	48	112,411	1, 2	1817	Штромейер
Caesium	Цезий	Cs	м	55	132,9054	1	1860	Бунзен, Кирхгоф
Calcium	Кальций	Ca	м	20	40,078	2	1808	Дэви
Californium[2]	Калифорний[2]	Cf	м	98	252	2; 3; 4	1950	Сиборг и др
Carbon	Углерод	C	н	6	12,011	2, 4	в древн	–
Cerium	Церий	Ce	м	58	140,116	3; 4	1803	Берцелиус и др.
Chlorine	Хлор	Cl	г	17	35,4527	1; 3; 4; 5; 6; 7	1774	Шееле
Chromium	Хром	Cr	м	24	51,9961	1; 2; 3; 4; 5; 6	1780	Воклен
Cobalt	Кобальт	Co	м	27	58,9332	1; 2; 3; 4; 5	1735	Брандт
Copernicium[2]	Коперниций[2]	Cn	м[3]	112	283	–[4]	1996	Хофманн
Copper	Медь	Cu	м	29	63,546	1; 2, 3	в древн.	–
Curium[2]	Кюрий[2]	Cm	м	96	247	2; 3; 4	1944	Сиборг и др.
Darmstadtium[2]	Дармштадтий[2]	Ds	м[3]	110	281	–[4]	1994	Армбрустер, Хофманн
Dubnium[2]	Дубний[2]	Db	м[3]	105	262	5 (?)	1967/70	дискутируется (Флеров или Гиорсо)
Dysprosium	Диспрозий	Dy	м	66	162,50	2; 3; 4	1886	Лекок де Буабодран
Einsteinium[2]	Эйнштейний[2]	Es	м	99	252	3	1952	Гиорсо и др.
Erbium	Эрбий	Er	м	68	167,26	3	1842	Мосандер
Europium	Европий	Eu	м	63	151,964	2; 3	1901	Демарсей
Fermium[2]	Фермий[2]	Fm	м[3]	100	257	3	1952	Гиорсо и др.
Fluorine	Фтор	F	г	9	18,998	1	1887	Муассан
Francium	Франций	Fr	м	87	223	1	1939	Перей
Gadolinium	Гадолиний	Gd	м	64	157,25	2, 3	1880	де Мариньяк
Gallium	Галлий	Ga	м	31	69,723	1; 2; 3	1875	Лекок де Буабодран
Germanium	Германий	Ge	м	332	72,61	2; 4	1886	Винклер
Gold	Золото	Au	м	79	196,9665	1; 3, 5; 7	в древн.	–
Hafnium	Гафний	Hf	м	72	178,49	4	1923	Хевеши, Костер
Hassium[2]	Гассий[2]	Hs	м[3]	108	270	–[4]	1984	Армбрустер, Мюнзенберг и др.
Helium	Гелий	He	г	2	4,003	0	1895	Рамзай, Клеве, Лангле
Holmium	Гольмий	Ho	м	67	164,9303	3	1878	Клеве, Делафонтен,
Hydrogen	Водород	H	г	1	1,0079	1	1766	Соре Кавендиш

[1] м – металл, н – неметалл; г – газ [2] Элемент получен искусственно, в природе не встречается
[3] Предположительно, элементы с атомным числом 100 . 112 – металлы [4] Валентность неизвестна

Название по указаниям Совета IUPAC	Русское название	Символ	Состояние[1]	Атомный номер	Атомная масса	Валентность	Год открытия элемента	Автор открытия элемента
Indium	Индий	In	м	49	114,818	1; 2; 3	1863	Рейх, Рихтер
Iodine	Йод	I	н	53	126,9045	1; 3; 5, 7	1811	Куртуа
Iridium	Иридий	Ir	м	77	192,217	3; 4	1803	Теннант
Iron	Железо	Fe	м	26	55,845	2; 3; 6	в древн.	–
Krypton	Криптон	Kr	г	36	83,80	0; 2	1898	Рамзай
Lanthanum	Лантан	La	м	57	138,9055	3	1839	Мосандер
Lawrencium[2]	Лоуренсий[2]	Lr	м[3]	103	262	3	1961	Гиорсо и др.
Lead	Свинец	Pb	м	82	207,2	2; 4	в древн.	–
Lithium	Литий	Li	м	3	6,941	1	1817	Арфведсон
Lutetium	Лютеций	Lu	м	71	174,967	3	1907	Урбэн, Джеймс
Magnesium	Магний	Mg	м	12	24,3050	2	1755	Блэк
Manganese	Марганец	Mn	м	25	54,9380	2; 3, 4; 6; 7	1774	Ган
Meitnerium	Мейтнерий	Mt	м[3]	109	268	–[4]	1982	Армбрустер, Мюнзенберг и др.
Mendelevium[2]	Менделевий[2]	Md	м[3]	101	258	2, 3	1955	Сиборг, Гиорсо и др.
Mercury	Ртуть	Hg	м	80	200,59	1; 2	в древн.	–
Molybdenum	Молибден	Mo	м	42	95,94	2; 3, 4; 5; 6	1781	Гьельм
Neodymium	Неодим	Nd	м	60	144,24	2; 3, 4	1885	Ауэр фон Вельсбах
Neon	Неон	Ne	г	10	20,1797	0	1898	Рамзай, Траверс
Neptunium[2]	Нептуний[2]	Np	м	93	237	3; 4; 5; 6	1940	Макмиллан, Абельсон
Nickel	Никель	Ni	м	28	58,6934	2; 3	1751	Кронштедт
Niobium	Ниобий	Nb	м	41	92,9064	3; 4; 5	1801	Гетчет
Nitrogen	Азот	N	г	7	14,0067	2; 3; 4; 5	1772	Резерфорд
Nobelium[2]	Нобелий[2]	No	м[3]	102	259	2, 3	1958	Гиорсо, Сиборг
Osmium	Осмий	Os	м	76	190,23	2; 3; 4; 5, 7; 8	1803	Теннант
Oxygen	Кислород	O	г	8	15,9994	1; 2	1774	Пристли, Шееле
Palladium	Палладий	Pd	м	46	106,42	2; 4	1803	Волластон
Phosphorus	Фосфор	P	н	15	30,9738	3; 5	1669	Брандт
Platinum	Платина	Pt	м	78	195,078	2; 4; 5; 6	в древн.	(племя майя)
Plutonium[2]	Плутоний[2]	Pu	м	94	244	3; 4; 5; 6	1940	Сиборг и др.
Polonium	Полоний	Po	м	84	209	2; 4; 6	1898	М. Кюри
Potassium	Калий	K	м	19	39,0983	1	1807	Дэви
Praseodymium	Празеодим	Pr	м	59	140,9076	3, 4	1885	Ауэр фон Вельсбах
Promethium	Прометий	Pm	м	61	145	3	1945	Маринский и др.
Protactinium	Протактиний	Pa	м	91	231,0359	4; 5	1917	Ган, Мейтнер, Фаянс
Radium	Радий	Ra	м	88	226	2	1898	П. и М. Кюри
Radon	Радон	Rn	г	86	222	0; 2	1900	Дорн
Rhenium	Рений	Re	м	75	186,207	1; 2; 3; 4;	1925	Ноддак
Rhodium	Родий	Rh	м	45	102,9055	5; 6; 7	1803	Волластон
Roentgenium[2]	Рентгений[2]	Rg	м[3]	111	280	1; 2; 3; 4; 5; 6	1994	Хофман
Rubidium	Рубидий	Rb	м	37	85,4678	–[4]	1861	Бунзен, Кирхгоф
Ruthenium	Рутений	Ru	м	44	101,07	1	1808	Клаус
Rutherfordium[2]	Резерфордий[2]	Rf	м[3]	104	261	1; 2; 3; 4, 5; 6; 7; 8 4 (?)	1964/69	дискутируется (Флеров или Гиорсо)

[1] м – металл, н – неметалл, г – газ [2] Элемент получен искусственно, в природе не встречается.
[3] Предположительно, элементы с атомным числом 100...112 – металлы. [4] Валентность неизвестна

Название по указаниям Совета IUPAC	Русское название	Символ	Состояние[1]	Атомный номер	Атомная масса	Валентность	Год открытия элемента	Автор открытия элемента
Samarium	Самарий	Sm	м	62	150,36	2; 3	1879	Лекок де
Scandium	Скандий	Sc	м	21	44,9559	3	1879	Буабодран
Seaborgium[2]	Сиборгий[2]	Sg	м[3]	106	266	–[4]	1974	Нильсон
Selenium	Селен	Se	н	34	78,96	2; 4; 6	1817	Гиорсо и др.
Silicon	Кремний	Si	н	14	28,0855	2; 4	1824	Берцелиус
Silver	Серебро	Ag	м	47	107,8682	1; 2	в древн.	Берцелиус
Sodium	Натрий	Na	м	11	22,9898	1	1807	–
Strontium	Стронций	Sr	м	38	87,62	2	1790	Дэви
Sulfur	Сера	S	н	16	32,066	1; 2; 3; 4; 5; 6	в древн.	Крофорд
Tantalum	Тантал	Ta	м	73	180,9479	1; 3, 4; 5	1802	Экеберг
Technetium	Технеций	Tc	м	43	98	4, 5, 6; 7	1937	Перье, Сегре
Tellurium	Теллур	Te	м	52	127,60	2; 4; 6	1783	Мюллер
Terbium	Тербий	Tb	м	65	158,9253	3; 4	1843	Мосандер
Tin	Олово	Sn	м	50	118,710	2; 4	в древн.	–
Thallium	Таллий	Tl	м	81	204,3833	1; 3	1861	Крукс
Thorium	Торий	Th	м	90	232,0381	2; 3; 4	1829	Берцелиус
Thulium	Тулий	Tm	м	69	168,9342	2; 3	1879	Клеве
Titanium	Титан	Ti	м	22	47,87	2, 3; 4	1791	Грегор
Tungsten	Вольфрам	W	м	74	183,84	2; 3; 4; 5; 6	1783	Элуяр
Ununhexium[2][5]	Унунгексий[2][5]	Uuh	–[4]	116	289	–[4]	2000	Оганесян
Ununoctium[2][5]	Унуноктий[2][5]	Uuo	–[4]	118	294	–[4]	2002	Оганесян
Ununpentium[2][5]	Унунпентий[2][5]	Uup	–[4]	115	288	–[4]	2003	Международная группа
Ununquadium[2][5]	Унунквадий[2][5]	Uuq	–[4]	114	289	–[4]	1998	Международная группа
Ununtrium[2][5]	Унунтрий[2][5]	Uut	–[4]	113	287	–[4]	2003	Международная группа
Uranium	Уран	U	м	92	238,0289	2; 4, 5; 6	1789	Клапрот
Vanadium	Ванадий	V	м	23	50,9415	2, 3; 4; 5	1801	дель Рио
Xenon	Ксенон	Xe	г	54	131,29	0; 2; 4; 6, 8	1898	Рамзай, Траверс
Ytterbium	Иттербий	Yb	м	70	173,04	2, 3	1878	де Мариньяк
Yttrium	Иттрий	Y	м	39	88,9059	3	1794	Гадолин
Zinc	Цинк	Zn	м	30	65,39	2	в древн.	–
Zirconium	Цирконий	Zr	м	40	91,224	3; 4	1789	Клапрот

[1] м – металл; н – неметалл; г – газ. [2] Элемент получен искусственно, в природе не встречается.
[3] Предположительно, элементы с атомным числом 100. 112 – металлы [4] Валентность неизвестна.
[5] Временные указания Совета IUPAC (Совета Международного союза по чистой и прикладной химии)

Периодическая система элементов Д.И. Менделеева

Ia	IIa	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	VIIIb	VIIIb	Ib	IIb	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa
1 H 1 008																	2 He 4 003
3 Li 6 941	4 Be 9 012											5 B 10 811	6 C 12 011	7 N 14 007	8 O 15 999	9 F 18 998	10 Ne 20 180
11 Na 22 990	12 Mg 24 305											13 Al 26 982	14 Si 28 086	15 P 30 974	16 S 32 066	17 Cl 35 453	18 Ar 39 948
19 K 39 098	20 Ca 40 078	21 Sc 44 956	22 Ti 47 87	23 V 50 942	24 Cr 51 996	25 Mn 54 938	26 Fe 55 845	27 Co 58.933	28 Ni 58 693	29 Cu 63 546	30 Zn 65 39	31 Ga 69 723	32 Ge 72 61	33 As 74 922	34 Se 78 96	35 Br 79 904	36 Kr 83.80
37 Rb 85 468	38 Sr 87 62	39 Y 88 906	40 Zr 91 224	41 Nb 92 906	42 Mo 95 94	43 Tc (98)	44 Ru 101 07	45 Rh 102 906	46 Pd 106 42	47 Ag 107 868	48 Cd 112 411	49 In 114 818	50 Sn 118 710	51 Sb 121 760	52 Te 127 60	53 I 126 904	54 Xe 131 29
55 Cs 132 905	56 Ba 137 327	57 La* 138 906	72 Hf 178 49	73 Ta 180 948	74 W 183 84	75 Re 186 207	76 Os 190 23	77 Ir 192 217	78 Pt 195 078	79 Au 196 967	80 Hg 200 59	81 Tl 204 383	82 Pb 207 2	83 Bi 208 980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac** (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (270)	109 Mt (268)	110 Ds (281)	111 Rg (280)	112 Cn (283)	113 Uut (287)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (289)	–	118 Uuo (294)

*	58 Ce 140 116	59 Pr 140 908	60 Nd 144 24	61 Pm (145)	62 Sm 150 36	63 Eu 151 964	64 Gd 157 25	65 Tb 158 925	66 Dy 162 50	67 Ho 164 930	68 Er 167 26	69 Tm 168 934	70 Yb 173 04	71 Lu 174 967
**	90 Th 232 038	91 Pa 231 036	92 U 238.029	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (252)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

Все элементы расположены в соответствии с атомным номером (числом протонов). В горизонтальных рядах расположены периоды, в вертикальных рядах — группы элементов. Атомная масса приведена под символом элемента.
Атомные массы стабильных изотопов радиоактивных элементов указаны в скобках.

Материалы

Определения

Агрегатное состояние: в зависимости от состояния и свойств внутренней структуры вещества (атомов, молекул, ионов), оно может находиться в трех основных агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Физическое состояние вещества зависит от давления и температуры. Плазму (ионизированный газ с высокой электрической проводимостью) часто рассматривают как четвертое агрегатное состояние вещества.

Соединение: возможность объединения двух и более химических элементов, массы которых всегда одинаково пропорциональны друг другу. Соединения имеют уникальную структуру. Существуют три различных типа соединений, в зависимости от образующих их элементов, – молекулярные, ионные и металлические. Соединения металлов также называют сплавами.

Растворимость: способность различных материалов при смешивании образовывать однородную смесь на атомарном или молекулярном уровнях. Растворимость твердых тел, жидкостей или газов в растворителе зависит от свойств самих веществ и от условий окружающей среды.

Диспергирование: способность путем тонкого измельчения образовывать дисперсные системы, состоящие из двух или более фаз. Одна из фаз образует дисперсную среду, по объему которой распределена дисперсная фаза в виде мелких твердых частиц.

Суспензия: дисперсная система, в которой твердые частицы распределены в жидкости, например, глина в воде.

Эмульсия: дисперсная система, состоящая из двух жидкостей, которые не могут смешиваться друг с другом, например, масляный жир в молоке.

Коллоидные растворы: суспенсии или эмульсии называются коллоидными растворами, если размеры частиц или капель дисперсной фазы составляют от 1 нм до 10 мкм. Примеры: дым, туман, матовое стекло.

Параметры материалов

Плотность

Плотность – масса, отнесенная к единице объема.

Радиальное сопротивление смятию

Радиальное сопротивление смятию – прочностная характеристика металлокерамических материалов, применяемых в подшипниках скольжения. Она определяется величиной давления, необходимого для смятия полого металлокерамического цилиндра.

Дополнительную информацию см. в «Technical Conditions of Delivery for PM Parts (Sint. 03)», Aug. 1981 Edition.

Предел текучести 0,2 %

Предел текучести 0,2 % соответствует напряжению растяжения при пластической деформации твердого тела на 0,2 %; этот параметр определяется из зависимости напряжение–удлинение σ-ε при стандартных испытаниях на растяжение.

Предел текучести 0,2 % аналогично определяется при циклическом нагружении тестируемого образца на растяжение/сжатие. Предел текучести при циклическом нагружении сравнивается с соответствующим параметром при однородном нагружении для оценки закаливания материала или, наоборот, возможного разупрочнения, вызванного циклическими перегрузками.

Коэффициент предела текучести γ определяется как отношение предела текучести 0,2 % при циклическом нагружении к пределу текучести 0,2 % при однородном нагружении. При $\gamma > 1$ материал упрочнен, при $\gamma < 1$ – разупрочнен.

Прочность на разрыв

Прочность на разрыв, характеризуемая коэффициентом K_{Ic}, определяет механизм развития трещины в материале. Коэффициент K_{Ic} соответствует началу образования трещины, при котором состояние трещины становится неустойчивым, и возможно ее развитие, приводящее к нарушению структурной целостности материала. Если величина K_{Ic} известна, то можно определить критическую для материала нагрузку по условиям прочности на разрыв или при заданной внешней нагрузке определить критическую длину трещины.

Удельная теплоемкость
Удельная теплоемкость – количество теплоты в Дж, необходимое для повышения температуры 1 кг вещества на 1 К. Удельная теплоемкость является функцией температуры.

Применительно к газам следует различать удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_v. Для твердых и жидких состояний вещества различие между c_p и c_v незначительно.

Удельная теплота плавления
Удельная теплота плавления твердого тела – это количество теплоты в Дж, необходимое для преобразования при температуре плавления 1 кг его массы в жидкое состояние.

Удельная теплота парообразования
Удельная теплота парообразования – количество теплоты в Дж, которое нужно сообщить 1 кг жидкости, находящейся при температуре кипения, для того, чтобы перевести ее в газообразное состояние. Удельная теплота парообразования в значительной степени зависит от внешнего давления.

Теплопроводность
Теплопроводность – количество теплоты в Дж, которое проходит в течение 1 с по образцу материала толщиной 1 м и площадью внешней поверхности 1 м^2 при разнице температур на поверхности противоположных сторон образца 1 К.

Для жидкостей и газов теплопроводность во многих случаях зависит в значительной мере от внешней температуры, в то время как для твердых тел внешняя температура не имеет существенного значения.

Коэффициент теплового расширения
Коэффициент линейного теплового расширения α оценивает относительное удлинение твердого тела при изменении его температуры на 1 К. Величина линейного удлинения, совершаемого вследствие изменения температуры на величину ΔT, определяется зависимостью $\Delta l = l\,\alpha\,\Delta T$. Аналогичным образом определяется и коэффициент объемного теплового расширения тел. Для газов соотношение коэффициентов линейного и объемного расширения равно 1/273, для твердых тел – 1/3.

Магнитная проницаемость
Магнитная проницаемость μ или относительная магнитная проницаемость среды μ_r описывается зависимостью индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля: $B = \mu_r \mu_0 H$.
В зависимости от области применения магнитных материалов, они делятся на 15 типов по их магнитной проницаемости в соответствии со степенью модуляции и видом их нагружения (магнитным полем переменного или постоянного тока). Примеры:

Исходная магнитная проницаемость μ_a
Определяется крутизной стандартной зависимости B при $H \to 0$, В большинстве случаев удельная индукция магнитного поля (в мА/см) превышает этот предел. Так, μ_4 – магнитная проницаемость природных магнитных материалов при $H = 4$ мА/см.

Максимум магнитной проницаемости μ_{max}
Определяется максимальной крутизной зависимости B от H.

Постоянная магнитная проницаемость μ_p или μ_{rec}
Определяется средним углом наклона обратной кривой петли магнитного гистерезиса зависимости индукции магнитного поля, нижняя ветвь которой соответствует кривой размагничивания материала: $\mu_p = \Delta B / (\Delta H\ \mu_0)$

Температурный коэффициент магнитной поляризации $TK(J_s)$
Определяет относительное изменение намагничивания с изменением температуры; выражается в % к градусам К.

Температурный коэффициент коэрцитивной напряженности магнитного поля $TK(H_c)$
Определяет относительное изменение коэрцитивной напряженности магнитного поля с изменением температуры; выражается в % к градусам К.

Точка Кюри (температура Кюри) T_c
Точка Кюри – температура, при которой намагниченность ферромагнитных материалов равна нулю и при которой они ведут себя как парамагнитные материалы (см. свойства мягких ферритов).

Свойства твердых материалов [8]

Материал	Плотность,	Точка плавления [1],	Точка кипения [1],	Теплопроводность [2],	Теплоемкость [3],	Удельная теплота плавления ΔH [4],	Коэф. лин. теплового расширения [3],
	г/см³	°C	°C	Вт/(м·К)	кДж/(кг·К)	кДж/кг	x10⁻⁶/K
Aluminium Al (алюминий)	2,70	660	2467	237	0,90	395	23,0
Aluminium alloy (ал.сплав)	2,60–2,85	480–655	-	70–240	–	–	21–24
Amber (янтарь)	1,0–1,1	≈ 300	разлаг.	–	–	–	–
Antimony Sb (сурьма)	6,69	630,8	1635	24,3	0,21	172	8,5
Arsenic As (мышьяк)	5,73	-	613[5]	50,0	0,34	370	4,7
Asbestos (асбест)	2,1–2,8	≈ 1300	–	–	0,81	–	–
Asphalt (асфальт)	1,1–1,4	80–100	≈ 300	0,70	0,92	–	–
Barium Ba (барий)	3,50	729	1637	18,4	0,28	55,8	18,1–21,0
$BaCl_2$ (хлорид бария)	3,86	963	1560	–	0,38	108	–
Basalt (базальт)	2,6–3,3	–	–	1,67	0,86	–	–
Beef tallow (жив. жир)	0,9–0,97	40–50	≈ 350	–	0,87	–	–
Beryllium Be (бериллий)	1,85	1278	2970	200	1,88	1087	11,5
Bismuth Bi (висмут)	9,75	271	1551	8,1	0,13	59	12,1
Bitumen (битум)	1,05	≈ 90	–	0,17	1,78	–	–
Boiler scale (накипь парового котла)	~ 2,5	≈ 1200	–	0,12–2,3	0,80	–	–
Borax (бура)	1,72	740	–	–	1,00	–	–
Boron B (бор)	2,34	2027	3802	27,0	1,30	2053	5
Brass CuZn37 (латунь)	8,4	900	1110	113	0,38	167	18,5
Brickwork (кирпич)	> 1,9	–	–	1,0	0,9	–	–
Bronze CuSn 6 (бронза)	8,8	910	2300	64	0,37	–	17,5
Cadmium Cd (кадмий)	8,65	321,1	765	96,8	0,23	54,4	29,8
Calcium Ca (кальций)	1,54	839	1492	200	0,62	233	22
$CaCl_2$ (хлорид кальция)	2,15	782	> 1600	–	0,69	–	–
Cellulose (целлюлоза)	1,3	–	–	0,26	1,47	–	100–160
Cement (цемент, твердый)	2,0–2,2	–	–	0,9–1,2	1,13	–	–
Chalk (мел)	1,8–2,6	разложение на CaO и CO_2		0,92	0,84	–	–
Chamotte (шамот)	1,7–2,4	≈ 2,000	–	1,4	0,80	–	–
Charcoal (древесн. уголь)	0,3–0,5	–	–	0,084	1,0	–	–
Chromium Cr (хром)	7,19	1875	2482	93,7	0,45	294	6,2
Cr_2O_3 (оксид хрома)	5,21	2435	4000	0,42[6]	0,75	–	–
Clay, dry (глина обезвож.)	1,5–1,8	≈ 1600	–	0,9–1,3	0,88	–	–
Cobalt Co (кобальт)	8,9	1495	2956	69,1	0,44	268	12,4
Coke (кокс)	1,6–1,9	–	–	0,18	0,83	–	–
Colophonium (канифоль)	1,08	100–130	разлаг.	0,32	1,21	–	–
Common salt (стол. соль)	2,15	802	1440	–	0,92	–	–
Concrete (бетон)	1,8–2,2	–	–	≈ 1,0	0,88	–	–
Copper Cu (медь)	8,96	1084,9	2582	401	0,38	205	–
Cork (пробка)	0,1–0,3	–	–	0,04–0,06	1,7–2,1	–	–
Corundum (корунд)	–	–	–	–	–	–	6,5[7]
Cotton (хлопок, набивка)	0,01	–	–	0,04	–	–	–
Diamond C (алмаз)	3,5	3820	–	–	0,52	–	1,1
Foam rubber (резина губчатая)	0,06–0,25	–	–	0,04–0,06	–	–	–
Germanium Ge (германий)	5,32	937	2830	59,9	0,31	478	5,6

[1] При давлении 1,013 бар [2] При температуре 20 °C. ΔH химических элементов – при 27 °C (300 K). [3] При температуре 0–100 °C [4] При температуре плавления и давлении 1,013 бар. [5] Сублимация. [6] В порошкообразном виде [7] При температуре 20–1000 °C [8] См. "Материалы".

Материал	Плотность, г/см³	Точка плавления [1], °C	Точка кипения [1], °C	Теплопроводность [2], Вт/(м·К)	Теплоемкость [3], кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления ΔH [4], кДж/кг	Коэф. лин. теплового расширения [3], x10⁻⁶/K
Glass (стекло кварцевое)	–	–	–	–	–	–	0,5
Glass (стекло оконное)	2,4–2,7	≈ 700	–	0,81	0,83	–	≈ 8
Gold Au (золото)	19,32	1064	2967	317	0,13	64,5	14,2
Granite (гранит)	2,7	–	–	3,49	0,83	–	–
Graphite (графит чистый)	2,24	≈ 3800	≈ 4200	168	0,71	–	2,7
Gray cast iron (сер. чугун)	7,25	1200	2500	58	0,50	125	10,5
Hard coal (каменн. уголь)	1,35	–	–	0,24	1,02	–	–
Hard metal K20 (тв. сплав)	14,8	> 2000	≈ 4000	81,4	0,80	–	5–7
Hard rubber (тв. резина)	1,2–1,5	–	–	0,16	1,42	–	50–90 [8]
Heat-cond. alloy NiCr 8020 (сплав нагр. элементов)	8,3	1400	2350	14,6	0,50 [6]	–	–
HR foam [5] (вспененная пластмасса)	0,015–0,06	–	–	0,04–0,06	–	–	–
(вспененная фреоном)	0,015–0,06	–	–	0,02–0,03	–	–	–
Ice (0 °C) (лед)	0,92	0	100	2,33 [7]	2,09 [7]	333	51 [8]
Indium In (индий)	7,29	156,6	2006	81,6	0,24	28,4	33
Iodine I (йод)	4,95	113,5	184	0,45	0,22	120,3	–
Iridium Ir (иридий)	22,55	2447	4547	147	0,13	137	6,4
Iron Fe (железо чистое)	7,87	1535	2887	80,2	0,45	267	12,3
Lead Pb (свинец)	11,3	327,5	1749	35,5	0,13	24,7	29,1
Lead monoxide (PbO)	9,3	880	1480	–	0,22	–	–
Leather (кожа сухая)	0,86–1,00	–	–	0,14–0,16	≈ 1,5	–	
Linoleum (линолеум)	1,2	–	–	0,19	–	–	–
Lithium Li (литий)	0,534	180,5	1317	84,7	3,3	663	56
Magnesium Mg (магний)	1,74	648,8	1100	156	1,02	372	26,1
Magnesium alloys (сплав)	≈ 1,8	≈ 630	1500	46–139	–	–	24,5
Manganese Mn (марганец)	7,47	1244	2100	7,82	0,48	362	22
Marble $CaCO_3$ (мрамор)	2,6–2,8	разлаг. на CaO и CO_2		2,8	0,84	–	–
Mica (слюда)	2,6–2,9	разлаг. при 700 °C		0,35	0,87	–	3
Molybdenum Mo (молибден)	10,22	2623	5560	138	0,28	288	5,4
Monel (медно-никелевый сплав)	8,8	1240–1330	–	19,7	0,43	–	
Mortar (цементн. раствор)	1,6–1,8	–	–	1,40	–	–	–
Mortar (известк. раствор)	1,6–1,8	–	–	0,87	–	–	–
Nickel Ni (никель)	8,90	1455	2782	90,7	0,46	300	13,3
Nickel silver (сплав CuNi12Zn24)	8,7	1020	–	48	0,40	–	18
Niobium Nb (ниобий)	8,58	2477	4540	53,7	0,26	293	7,1
Osmium Os (осмий)	22,57	3045	5027	87,6	0,13	154	4,3–6,8
Palladium Pd (палладий)	12,0	1554	2927	71,8	0,24	162	11,2
Paper (бумага)	0,7–1,2	–	–	0,14	1,34	–	–
Paraffin (парафин)	0,9	52	300	0,26	3,27	–	–
Peat (торф сухой)	0,19	–	–	0,081	–	–	–

[1]) При давлении 1,013 бар [2]) При температуре 20 °C ΔH химических элементов при 27 °C (300 K) [3]) При температуре 0–100 °C. [4]) При температуре плавления и давлении 1,013 бар [5]) феноло-альдегидный полимер, полистирол, полиэтилен и т. п. Значения зависят от диаметра ячеек и наполнителя газа [6]) При температуре 0–1000 °C [7]) При температуре от –20 до 0 °C [8]) При температуре от –20 до –1 °C

Материал	Плотность, г/см³	Точка плавления [1], °C	Точка кипения [1], °C	Теплопроводность [2], Вт/(м·К)	Теплоемкость [3], кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления ΔH [4], кДж/кг	Коэф. лин. теплового расширения [3], x10⁻⁶/K
Phosphorus P (фосфор белый)	1,82	44,1	280,4	–	0,79	20	–
Pitch (смола)	1,25	–	–	0,13	–	–	–
Plaster (гипс)	2,3	1200	–	0,45	1,09	–	–
Platinum Pt (платина)	21,45	1769	3827	71,6	0,13	101	9
Plutonium Pu (плутоний)	19,8	640	3454	6,7	0,14	11	55
Polyamide (полиамид)	1,1	–	–	0,31	–	–	70–150
Polycarbonate (поликарб.)	1,2	–	–	0,20	1,17	–	60–70
Polyethylene (полиэтилен)	0,94	–	–	0,41	2,1	–	200
Polystyrene (полистирол)	1,05	–	–	0,17	1,3	–	70
Polyvinyl chloride (поливинилхлорид)	1,4	–	–	0,16	–	–	70–150
Porcelain (фарфор)	2,3–2,5	≈ 1600	–	1,6[5]	1,2[5]	–	4–5
Potassium K (калий)	0,86	63,65	754	102,4	0,74	61,4	83
Quartz (кварц)	2,1–2,5	1480	2230	9,9	0,80	–	8[6]/14,6[7]
Radium Ra (радий)	5	700	1630	18,6	0,12	32	20,2
Red bronze CuSn5ZnPb (красная бронза)	8,8	950	2300	38	0,67	–	–
Resin bonded fabric (многослойная ткань)	1,3–1,4			0,23	1,47		10–25[8]
Red lead Pb_3O_4 (свинцовый сурик)	8,6–9,1	Forms PbO		0,70	0,092	–	–
Resistance alloy CuNi 44 (медноникелевый сплав)	8,9	1280	~ 2400	22,6	0,41	–	15,2
Rhenium Re (рений)	21,02	3160	5762	150	0,14	178	8,4
Rubber (сырой каучук)	0,92	125	–	0,15	–	–	
Roofing felt (кровельный картон)	1,1	–	–	0,19	–		–
Rubidium Rb (рубидий)	1,53	38,9	688	58	0,33	26	90
Sand (песок кварцевый)	1,5–1,7	≈ 1500	2230	0,58	0,80	–	–
Sandstone (песчаник)	2,0–2,5	≈ 1500	–	2,3	0,71	–	–
Selenium Se (селен)	4,8	217	684,9	2,0	0,34	64,6	37
Silicon Si (кремний)	2,33	1410	2480	148	0,68	1,410	4,2
Silicon carbide (карбид кремния)	2,4	Разлаг. при темп. свыше 3000 °C		9[9]	1,05[9]	–	4,0
Sillimanite (силлиманит)	2,4	1820	–	151	1,0	–	–
Silver Ag (серебро)	10,5	961,9	2195	429	0,24	104,7	19,2
Slag (шлак)	2,5–3,0	1300–1400	–	0,14	0,84	–	–
Sodium Na (натрий)	0,97	97,81	883	141	1,24	115	70,6
Soft rubber (резина)	1,08	–	–	0,14–0,24	–	–	–
Soot (сажа)	1,7–1,8	–	–	0,07	0,84	–	–
Steatite (стеатит)	2,6–2,7	≈ 1520	–	1,6[11]	0,83	–	8–9[10]
Steel (хромистая сталь)	–	–	–	–	–	–	11
Steel (электросталь)	–	–	–	–	–	–	12
Steel (высокоскор. сталь)	–	–	–	–	–	–	11,5
Steel AlNiCo12/6 (магнитная сталь)	–	–			–	–	11,5

[1]) При давлении 1,013 бар. [2]) При температуре 20 °C ΔH химических элементов при 27 °C (300 K) [3]) При температуре 0–100 °C [4]) При температуре плавления и давлении 1,013 бар. [5]) При температуре 0–100 °C [6]) Параллельно оси кристалла [7]) Перпендикулярно оси кристалла. [8]) При температуре 20–50 °C [9]) При температуре 1000 °C. [10]) При температуре 20–1000 °C. [11]) At 100–200 °C

Материал	Плотность, г/см³	Точка плавления [1], °C	Точка кипения [1], °C	Теплопроводность [2], Вт/(м·К)	Теплоемкость [3], кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления ΔH [4], кДж/кг	Коэф. лин теплового расширения [3], x10⁻⁶/K
Steel, nickel (сталь 36%Ni)	–	–	–	–	–	–	1,5
Steel (сталь металлокер.)	–	–	–	–	–	–	11,5
Steel (сталь нержавеющ. 18Cr 8Ni)	7,9	1450	–	14	0,51	–	16
Steel (сталь вольфр.18 W)	8,7	1450	–	26	0,42	–	–
Steel, unalloyed (сталь низколегированная)	7,9	1460	2500	48–58	0,49	205	11,5
Sulfur (α) S (альфа-сера)	2,07	112,8	444,67	0,27	0,73	38	74
Sulfur (β) S (бета-сера)	1,96	119,0	–	–	–	–	–
Tantalum Ta (тантал)	16,65	2996	5487	57,5	0,14	174	6,6
Tellurium Te (теллур)	6,24	449,5	989,8	2,3	0,20	106	16,7
Thermosets (пластмасса термореактивная)							
Melamin resin (каучук меламиновый)	1,5	–	–	0,35	–	–	≈ 60
Phenolic resin (каучук фенольный без наполн.)	1,3	–	–	0,20	1,47	–	60
Phenolic resin (каучук фенольный с асбестом)	1,8	–	–	0,70	1,25	–	15–30
Phenolic resin (каучук фенол. с древес. мукой)	1,4	–	–	0,35	1,47	–	30–50
Phenolic resin (каучук фенол. с тех. тканью)	1,4	–	–	0,35	1,47	–	15–30
Thorium Th (торий)	11,72	1750	4227	54	0,14	< 83	12,5
Tin Sn (олово белое)	7,28	231,97	2270	65,7	0,23	61	21,2
Titanium Ti (титан)	4,51	1660	3313	21,9	0,52	437	8,3
Tombac CuZn 20 (томпак)	8,65	1000	≈ 1300	159	0,38	–	–
Tungsten W (вольфрам)	19,25	3422	5727	174	0,13	191	4,6
Uranium U (уран)	18,95	1132,3	3677	27,6	0,12	65	12,6
Vanadium V (ванадий)	6,11	1890	3000	30,7	0,50	345	8,3
Vulcanized fiber (фибра)	1,28	–	–	0,21	1,26	–	–
Wax (парафин)	0,96	60	–	0,084	3,4	–	–
Wood[5] (древесина)	0,72	–	–	0,16			
Ash (ясень)							
Balsa (бальза)	0,20	–	–	0,06		–	в направлении волокон
Beech (бук)	0,72	–	–	0,17		–	
Birch (береза)	0,63	–	–	0,14		–	
Maple (клен)	0,62	–	–	0,16			3–4, против направл. волокон
Oak (дуб)	0,69	–	–	0,17	2,1–2,9	–	
Pine (сосна)	0,52	–	–	0,14		–	
Poplar (тополь)	0,50	–	–	0,12		–	
Spruce, fir (ель, пихта)	0,45	–	–	0,14		–	22–43
Walnut (орех)	0,65	–	–	0,15		–	
Wood-wool slabs (ДСП)	0,36–0,57	–		0,093		–	–
Zinc Zn (цинк)	7,14	419,58	907	116	0,38	102	25,0
Zirconium Zr (цирконий)	6,51	1852	4377	22,7	0,28	252	5,8

[1]) При давлении 1,013 бар. [2]) При температуре 20 °C. ΔH химических элементов при 27 °C (300 K). [3]) При температуре 0–100 °C [4]) При температуре плавления и давлении 1,013 бар. [5]) Данные приведены для сухой древесины (влажность 12%). Теплопроводность измерена в радиальном направлении, данные в осевом направлении равны удвоенному значению, измеренному в радиальном направлении

Свойства жидкостей

Наименование		Плотность[2], г/см³	Точка плавления[1], °C	Точка кипения[1], °C	Теплопроводность[2], Вт/(м · K)	Удельная теплоемкость[2], кДж/(кг · K)	Удельная теплота плавления ΔH[3], кДж/кг	Удельная теплота испарения[4], кДж/кг	Коэффициент объемного расширения, x10⁻³/K
Acetone (ацетон)	$(CH_3)_2CO$								
Antifreeze (водный раствор антифриза)		0,79	–95	56	0,16	2,21	98,0	523	–
23 % по объему		1,03	–12	101	0,53	3,94	–	–	–
38 % по объему		1,04	–25	103	0,45	3,68	–	–	–
54 % по объему		1,06	–46	105	0,40	3,43	–	–	–
Benzene (бензол)	C_6H_6	0,88	+5,5[6]	80	0,15	1,70	127	394	1,25
Common-salt (столовая соль, раствор 20 %)		1,15	–18	109	0,58	3,43	–	–	–
Diesel fuel (дизельн. топливо)		0,81–0,85	–30	150–360	0,15	2,05	–	–	–
Ethanol (этиловый спирт)	C_2H_5OH	0,79	–117	78,5	0,17	2,43	109	904	1,1
Ethyl ether (этиловый растворитель)	$(C_2H_5)_2O$	0,71	–116	34,5	0,13	2,28	98,1	377	1,6
Ethyl chloride (этилхлорид)	C_2H_5Cl	0,90	–136	12	0,11[5]	1,54[5]	69,0	437	–
Ethylene glycol (этиленгликоль)									
Fuel oil EL (подогр. масло)	$C_2H_4(OH)_2$	1,11	–12	198	0,25	2,40	–	–	–
		≈ 0,83	–10	> 175	0,14	2,07	–	–	–
Gasoline/petrol (бензин)		0,72–0,75	–50,...–30	25–210	0,13	2,02	–	–	1,0
Glycerin (глицерин)	$C_3H_5(OH)_3$	1,26	+20	290	0,29	2,37	200	828	0,5
Hydrochloric acid 10 % (соляная кислота, 10%)	HCl	1,05	–14	102	0,50	3,14	–	–	–
Kerosene (керосин)		0,76–0,86	–70	> 150	0,13	2,16	–	–	1,0
Linseed oil		0,93	–15	316	0,17	1,88	–	–	–
Lubricating oil	C_6H_6	0,91	–20	> 300	0,13	2,09	–	–	–
Mercury[8]	Hg	13,55	–38,84	356,6	10	0,14	11,6	295	0,18
Methanol	CH_3OH	0,79	–98	65	0,20	2,51	99,2	1109	–
Methyl chloride	CH_3Cl	0,99[7]	–92	–24	0,16	1,38	–	406	–
m-xylene	$C_6H_4(CH_3)_2$	0,86	–48	139	–	–	–	339	–
Nitric acid, conc	HNO_3	1,51	–41	84	0,26	1,72	–	–	–

[1]) При давлении 1,013 бар. [2]) При температуре 20 °C. [3]) При температуре плавления и давлении 1,013 бар. [4]) При температуре кипения и давлении 1,013 бар.
[5]) При температуре 0 °C [6]) При температуре застывания 0 °C. [7]) При температуре –24 °C. [8]) При преобразовании Торра в Па используется плотность 13,5951 г/см³ (при температуре 0 °C).

Substance	Плотность[2]), г/см³	Точка плавления[1]), °C	Точка кипения[1]), °C	Теплопроводность[2]), Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость[2]), кДж/(кг · К)	Удельная теплота плавления ΔH^3), кДж/кг	Удельная теплота испарения[4]), кДж/кг	Коэффициент объемного расширения, x10⁻³/K
Paraffin oil (парафин. масло)	–	–	–	–	–	–	–	0,764
Petroleum ether (керосин этиловый)	0,66	–160	> 40	0,14	1,76	–	–	–
Rapeseed oil (рапсов. масло)	0,91	± 0	300	0,17	1,97	–	–	–
Silicone oil (силикон. масло)	0,76–0,98	–	–	0,13	1,09	–	–	–
Spirit 95 %[6]) (спирт-ректификат 95%)	0,81	–114	78	0,17	2,43	–	–	–
Sulfuric acid, conc. (серная кислота концентрированная) H_2SO_4	1,83	+10,5[5])	338	0,47	1,42	–	–	0,55
Tar, coke oven	1,2	–15	300	0,19	1,56	–	–	–
Toluene C_7H_8	0,87	–93	111	0,14	1,67	74,4	364	–
Transformer oil	0,88	–30	170	0,13	1,88	–	–	–
Trichloroethylene C_2HCl_3	1,46	–85	87	0,12	0,93	–	265	1,19
Turpentine oil	0,86	–10	160	0,11	1,80	–	293	1,0
Water	1,00[7])	± 0	100	0,60	4,18	332	2,256	0,18[8])

[1]) При давлении 1,013 бар. [2]) При температуре 20 °C. [3]) При температуре плавления и давлении 1,013 бар. [4]) При температуре кипения и давлении 1,013 бар. [5]) При температуре застывания 0 °C. [6]) Денатурированный этиловый спирт. [7]) При температуре 4 °C [8]) При замерзании объем увеличивается на 9 %.

Испарение воды

Абсолютное давление, бар	Точка кипения, °C	Удельная теплота испарения, кДж/кг	Абсолютное давление, бар	Точка кипения, °C	Удельная теплота испарения, кДж/кг
0,1233	50	2382	25,5	225	1837
0,3855	75	2321	39,78	250	1716
1,0133	100	2256	59,49	275	1573
2,3216	125	2187	85,92	300	1403
4,760	150	2113	120,5	325	1189
8,925	175	2031	165,4	350	892
15,55	200	1941	221,1	374,2	0

Свойства газов

Наименование		Плотность[1],	Точка плавления[2],	Точка кипения[2],	Теплопроводность[3],	Удельная теплоемкость[3], кДж/(кг · К)			Удельная теплота испарения[2],
		kg/m³	°C	°C	Вт/(м · К)	c_p	c_v	c_p/c_v	кДж/кг
Acetylene (ацетилен)	C_2H_2	1,17	–84	–81	0,021	1,64	1,33	1,23	751
Air (воздух атм.)		1,293	–220	–191	0,026	1,005	0,716	1,40	209
Ammonia (аммиак)	NH_3	0,77	–78	–33	0,024	2,06	1,56	1,32	1,369
Argon (аргон)	Ar	1,78	–189	–186	0,018	0,52	0,31	1,67	163
n-butane (н-бутан)	C_4H_{10}	2,70	–138	–0,5	0,016	1,67	1,51	1,10	–
i-butane (i-бутан)	C_4H_{10}	2,67	–145	–10,2	0,016	–	–	1,11	–
Blast-furn. (газ в печи)		1,28	–210	–170	0,024	1,05	0,75	1,40	–
Carbon disulfide (дисульфид углерода)	CS_2	3,41	–112	+46	0,0073	0,67	0,56	1,19	–
Carbon dioxide (диоксид углерода)	CO_2	1,98	–57[4]	–78	0,016	0,82	0,63	1,30	368
Carbon monoxide (моноксид углерода)	CO	1,25	–199	–191	0,025	1,05	0,75	1,40	–
Chlorine (хлор)	Cl_2	3,21	–101	–35	0,009	0,48	0,37	1,30	288
City gas (городской газ)		0,56–0,61	–230	–210	0,064	2,14	1,59	1,35	–
Cyanogen (циан)	$(CN)_2$	2,33	–34	–21	–	1,72	1,35	1,27	–
Freon F 12 (фреон Ф12)	CCl_2F_2	5,51	–140	–30	0,010	0,61	0,54	1,14	–
Ethane (этан)	C_2H_6	1,36	–183	–89	0,021	1,66	1,36	1,22	522
Ethanol (пары этанола)		2,04	–114	+78	0,015	–	–	1,13	–
Ethylene (этилен)	C_2H_4	1,26	–169	–104	0,020	1,47	1,18	1,24	516
Fluorine (фтор)	F_2	1,70	–220	–188	0,025	0,82	0,61	1,35	172
Helium (гелий)	He	0,18	–270	–269	0,15	5,20	3,15	1,65	20
Hydrogen (водород)	H_2	0,09	–258	–253	0,181	14,39	10,10	1,42	228
Hydrogen choride (хлорид водорода)	HCl	1,64	–114	–85	0,014	0,81	0,57	1,42	–
Hydrogen sulfide (сульфид водорода)	H_2S	1,54	–86	–61	0,013[1])	0,96	0,72	1,34	535
Krypton (криптон)	Kr	3,73	–157	–153	0,0095	0,25	0,15	1,67	108
Methane (метан)	CH_4	0,72	–183	–164	0,033	2,19	1,68	1,30	557
Methyl chloride (хлорид метила)	CH_3Cl	2,31	–92	–24	–	0,74	0,57	1,29	446
Neon (неон)	Ne	0,90	–249	–246	0,049	1,03	0,62	1,67	86
Nitrogen (азот)	N_2	1,24	–210	–196	0,026	1,04	0,74	1,40	199
Oxygen (кислород)	O_2	1,43	–218	–183	0,0267	0,92	0,65	1,41	213
Ozone (озон)	O_3	2,14	–251	–112	0,019	0,81	0,63	1,29	–
Propane (пропан)	C_3H_8	2,00	–182	–42	0,018	1,70	1,50	1,13	–
Propylene (пропилен)	C_3H_6	1,91	–185	–47	0,017	1,47	1,28	1,15	468
Sulfur dioxide (диоксид серы)	SO_2	2,93	–73	–10	0,010	0,64	0,46	1,40	402
Sulfur hexafl. (элегаз)	SF_6	6,16[3])	–50,8	–63,9	0,011	0,66	–	–	117[1])
Water vapor[5]) (вод. пар)		0,60	± 0	+100	0,025	2,01	1,52	1,32	–
Xenon (ксенон)	Xe	5,89	–112	–108	0,0057	0,16	0,096	1,67	96

[1]) При температуре 0 °C и давлении 1,013 бар. [2]) При давлении 1,013 бар. [3]) При 20 °C и давлении 1,013 бар
[4]) При 100 °C и давлении 5,3 бар. [5]) При насыщении и давлении 1,013 бар, см. также «Свойства жидкостей».

Материалы

Группы материалов

Материалы, используемые в настоящее время в промышленности, могут быть классифицированы по четырем категориям, каждая из которых включает ряд подгрупп:
- металлы: кованые, штампованные, прокатные, листовые, литые, металлокерамика;
- неметаллические неорганические материалы: керамические материалы, стекло;
- неметаллические органические материалы: природные материалы, пластмассы и эластомеры;
- композиционные материалы.

Магнитные материалы, образующие группу материалов со специфическими техническими характеристиками, выделены в отдельную группу.

Металлы

Металлы, имеющие кристаллическую структуру с атомами, расположенными в кристаллической решетке в регулярном порядке и свободными электронами атомов, перемещающимися по ней, характеризуются высокой электропроводностью, снижающейся с увеличением температуры; хорошей теплопроводностью; низкой светопроницаемостью; высокой оптической отражательной способностью; высокой пластичностью.

Сплавы – это металлические соединения, состоящие из двух и более компонентов, из которых как минимум один представлен металлом.

Штампованные, прокатные, литые и другие металлы

За исключением небольших дефектов изготовления, таких как усадочные раковины и неметаллические включения, в таких металлах отсутствуют пустоты. Составляющие компоненты могут соединяться непосредственно в процессе плавки (например, серый чугун, литой алюминий) или формоваться из полуфабрикатов (путем механической обработки или прессования).

Металлокерамические материалы

Обычно изготавливаются прессованием или спеканием порошкообразных смесей под давлением. Термическая обработка металлокерамических материалов производится при температурах 800–1300 °C. Область их применения определяется, помимо приобретенных химических свойств, степенью пористости. Компоненты сложной формы могут выполняться из спеченных металлов либо из легкосменных деталей, либо из деталей с небольшой отделкой.

Неметаллические неорганические материалы

Характеризуются ионными связями (например, керамические материалы), смешанными гетерополярными/гомополярными связями (например, стекло) и гомополярными связями (например, углерод). Имеют малые тепло- и электропроводность (последняя увеличивается с повышением температуры), низкую отражательную способность, большую хрупкость, препятствующую формованию материала в холодном состоянии.

Керамика

Большинство природных керамических материалов (порядка 70%) имеют аморфную структуру и высокую пористость. Изготавливается керамика аналогично металлокерамическим материалам, но при этом используются лишь порошкообразные неметаллические компоненты или их смеси. Спекание исходных компонентов обычно происходит при температурах свыше 1000 °C.

Стекло

Стекло имеет вид замороженной при сильном переохлаждении жидкости. Его атомы располагаются в виде коротких цепочек и в целом образуют аморфную структуру. Расплавленное стекло превращается в твердое тело при температуре, называемой температурой преобразования (стеклования) T_g. Поскольку температура T_g зависит от многих факторов, однозначная ее оценка невозможна.

Неметаллические органические материалы
Эти материалы состоят, в основном, из соединений углерода и водорода, а также азота, кислорода и других элементов. Большинство этих материалов обладает низкой термо- и электропроводностью, подвержено возгоранию.

Природные материалы
Природные материалы (дерево, кожа, смола, сырой каучук, волоконные материалы, изготовленные из шерсти, хлопка, льна, пеньки и шелка) используются в качестве отделочных материалов и сырья для изготовления синтетических материалов.

Пластмассы
Имеются три различных типа пластмасс: термопластические смолы, термореактивные пластмассы (иногда называемые термореактивными смолами) и эластомеры (полимеры), обладающие высокоэластичными свойствами. Температура преобразования T_E для термопластических и термореактивных пластмасс находится на уровне, превышающем температурный диапазон их применения, для эластомеров эти температуры сопоставимы. Температура преобразования пластмасс T_E (сравнимая с температурой преобразования стекла T_g) представляет собой температуру, ниже которой молекулярное движение в материале прекращается. Большое преимущество термопластов и реактопластов заключается в том, что они могут принимать определенную форму отливки без обработки.

Термопластические пластмассы
Размягчаются при температуре, превышающей T_E. Для снижения зависимости их физико-механических характеристик от температуры применяют соединения термопластических полимеров.

Термореактивные пластмассы
Сохраняют свои габаритные размеры до температуры, превышающей ТЕ. Механические свойства в меньшей степени, по сравнению с термопластическими смолами, зависят от температуры. В целях повышения стойкости к хрупкому разрушению, термореактивные смолы упрочняют различными наполнителями.

Эластомеры
Находят широкое применение благодаря своим упругим свойствам, сохраняющимся при температуре, превышающей T_E. Для стабилизации молекулярных связей эластомеры подвергают вулканизации.

Композиционные материалы
Композиционные материалы состоят из двух и более различных физических или химических компонентов, прочно соединенных между собой по определенным поверхностям раздела. Формирование поверхностей раздела не должно оказывать негативное воздействие на соединяемые компоненты. При соблюдении этих условий возможно соединение воедино нескольких материалов. Композиционные материалы обладают комбинацией свойств, которые не присущи отдельным компонентам. Композиционные материалы подразделяются на классы:
композиционные материалы, сформированные из частиц (например, порошкообразные наполнители смол, прочные металлы, упругопластичные соединения магнитных материалов, металлокерамика);
слоистые композиционные материалы (например, слоеные панели, соединенные смолами ткани);
волокнистые композиционные материалы (например, стекловолокно, углеродное волокно, упрочненное синтетикой хлопковое волокно).

Магнитные материалы
Материалы, обладающие ферромагнитными свойствами, называются магнитными материалами и относятся к одной из двух групп: металлы (литые или спеченные) или неметаллические неорганические материалы. Композиционные материалы также играют все более важную роль. Все они характеризуются способностью сохранять магнитную энергию (постоянные магниты) либо проводить магнитные потоки (слабые магниты). Кроме ферромагнитов, существуют диамагнетики, парамагнетики и антиферромагнитные материалы. Они отличаются друг от друга магнитной проницаемостью μ или магнитной восприимчивостью κ[1]).

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

[1]) Отношение степени намагничивания вещества к напряженности магнитного поля

Диамагнетики
Магнитная восприимчивость диамагнетиков κ_{dia} не зависит от температуры.

Парамагнетики
Магнитная восприимчивость κ_{para} изменяется по закону Кюри: $\kappa_{para} = C/T$,
где C – постоянная Кюри; T – температура в градусах К.

Ферромагнетики и ферродиэлектрики
Эти материалы лавинообразно намагничиваются до достижения точки Кюри (температуры Кюри T_c). При температуре выше точки Кюри они приобретают свойства парамагнетиков. При $T > T_c$ описываемая законом Кюри-Вейсса магнитная чувствительность равна: $\kappa = C/(T-T_c)$.

Индукция насыщения ферромагнетиков выше, чем у ферродиэлектриков. При этом ферродиэлектрики являются магнитными.

Антиферромагнитные материалы
Примеры: MnO, MnS, $FeCl_2$, FeO, NiO, Cr, V_2O_3, V_2O_4.
Как и в случае с ферродиэлектриками, магнитные моменты лежат в непараллельных плоскостях. Эффективность намагничивания такого материала равна нулю. При температуре выше точки Нееля (температуры Нееля T_N), антиферромагнитные материалы подобны парамагнетикам. При $T > T_N$ антиферромагнитная восприимчивость описывается выражением: $\kappa = C/(T+\Theta)$,
где Θ – асимптотическая температура Кюри.

Магнитомягкие материалы
Определение материалов этого класса приведено в соответствии с Германскими промышленными стандартами DIN.

Магнитомягкие металлы (DIN-IEC 60 404-8-6).

Многие материалы, определяемые этим стандартом, включены также в стандарты DIN 17 405 (реле постоянного тока) и DIN-IEC 740-2 (преобразователи и электрические реакторы).
Обозначение (состав):
буква, цифра 1, цифра 2 – цифра 3. Буква обозначает основной компонент сплава: «А» – чистое железо, «С» – кремний, «Е» – никель, «F» – кобальт.

Цифра 1 в обозначении материала указывает на концентрацию основного легирующего элемента. Цифра 2 определяет форму кривой гистерезиса: 1 – круговая, 2 – прямоугольная. Цифра 3 обозначает свойства, придаваемые легирующим элементом материалу. Она указывает на минимальную начальную магнитную проницаемость μ_a/1,000 никелевых сплавов; в других сплавах она указывает на наибольшую коэрцитивную напряженность магнитного поля (в А/м). В зависимости от геометрической формы материалов меняются их свойства и область применения. Данные материалов, указанные в извлечениях из стандарта, представляют собой очень общий обзор свойств этих материалов.

Тонколистовая электросталь
(входит в стандарт DIN 46 400).
Обозначение: буква 1, цифра 1 – цифра 2, буква 2.

Первая буква «М» обозначает металлические материалы. Цифра 1 указывает на стократную максимальную потерю на перемагничивание при 1,5 или 1,7 Тл и 50 Гц в Вт/кг. Цифра 2 указывает на номинальную глубину намагничиваемого слоя в мм.

Буква 2 обозначает:
«А» – холоднокатанная термически обработанная электросталь без ориентации зерен (DIN-EN 10 106). У термически обработанной электростали с ориентацией зерен (DIN-EN 10 107): «N» обозначает стандартную потерю магнитных свойств; «S» – ограниченную потерю магнитных свойств; «P» – нижний предел потери магнитных свойств; «D» – холоднокатанную нелегированную электросталь без термообработки (DIN-EN 10 126); «E» – холоднокатанную легированную электросталь без термообработки (DIN-EN 10 165).

Материалы для преобразователей и электрических реакторов (DIN-IEC 740-2).
Включают классы сплавов C21, C22, E11, E31 и E41, относящиеся к стандарту мягкомагнитных материалов (DIN-IEC 60 404-8-6).

Стандарт, главным образом, содержит значения минимальной магнитной проницаемости листовых сердечников для установленных секций тонколистовых сердечников (YEI, YED, YEE, YEL, YUI, and YM).

Материалы для реле постоянного тока (DIN 17405).
Обозначения:
a) буква «R» (материал для реле);
b) буквы для обозначения легированных материалов:
Fe – нелегированное железо; Si – кремниевые стали; Ni – никелевые или легированные стали;
c) код для обозначения наибольшей коэрцитивной напряженности магнитного поля;
d) буквы для обозначения условий поставки материла: «U» – в необработанном виде; «GB» – штампованный термически обработанный; «GT» – предварительно термически обработанный для холодной штамповки; «GF» – окончательно термически обработанный.

Обозначения по DIN-IEC 60404-8-10 магнитных материалов для реле, основанных на железе и стали:
- буква «M»;
- наибольшая величина коэрцитивной напряженности магнитного поля в А/м;
- буква, обозначающая состав материала: «F» – чистое трехвалентное железо; «T» – легированная сталь; «U» – нелегированная сталь;
- буква для обозначения условия поставки: «H» – горячекатанная; «C» – холоднокатанная или холоднотянутая;
- пример: M 80 TH.

Металлокерамические материалы для слабомагнитных элементов (DIN-IEC 60404-8-9).
Обозначения:
- буква «S» – металлокерамические материалы;
- далее – основные легирующие элементы, например, Fe плюс P, Si, Ni или Co;
- далее – наибольшая величина коэрцитивной напряженности магнитного поля в А/м.

Магнитомягкие ферритные сердечники (DIN 41280).
Формируются из деталей, изготовленных из металлокерамических материалов с общей формулой $MO \cdot Fe_2O_3$, где M – один или более двухвалентных металлов Cd, Co, Ca, Mg, Mn, Ni, Zn.

Обозначение: заглавными буквами с классификацией по группам в соответствии с номинальной начальной магнитной проницаемостью. Для подразделения на подгруппы используются дополнительные цифры.

Стандартный диапазон коэрцитивной напряженности магнитного поля слабомагнитных ферритов H_c составляет 4–500 А/м. При напряженности магнитного поля 3000 А/м, магнитная индукция B находится в диапазоне 350–470 мТл.

Порошковые композиционные материалы
Порошковые композиционные материалы еще не стандартизированы, но находят все большее применение. Они состоят из ферромагнитного металлического порошка (железного или из сплавов железа) и органического или керамического связующего. Порошковые материалы изготавливаются по тем же технологиям, что и спеченные металлы. К отдельным этапам производства относятся:
- смешивание сырья (металлического порошка и связующего);
- формирование материала штамповкой или прессованием;
- термическая обработка ниже температуры плавления (< 600 °C).

В зависимости от типа и количества связующего, можно создавать порошковые материалы с насыщенной поляризацией, повышенной магнитной проницаемостью или высоким электрическим сопротивлением.

Порошковые материалы используются в тех областях, где важны вышеуказанные характеристики и предъявляются не слишком высокие требования к механической прочности и качеству обработки. В настоящее время они применяются при изготовлении быстродействующих исполнительных механизмов систем управления дизелей, а также высокоскоростных небольших электродвигателей для автотранспортных средств.

Порошковые материалы в настоящее время покрывают следующий спектр свойств:

Тип	J_s, Т	μ_{max} –	ρ_{el}, мкОм	R_{tr}[1]), Н/мм²
A	1,6	120	> 500	40
B	1,8	400	> 50	60
C	> 2	> 750	> 5	> 100

[1]) R_{tr} — предел прочности при изгибе.

Материалы постоянных магнитов
(DIN 17410, заменен на DIN IEC 60404-8-1)
Используемые в наименовании этих материалов химические символы указывают на легирующие присадки. Цифры слева от диагональной разделительной линии указывают на значение $(BH)_{max}$ в кДж/м³; цифры справа – на величину H_{cJ} в кА/м (в десятых долях). Постоянные магниты со связующим материалом обозначены в конце буквой р.

Обозначение сокращенных названий или цифровых кодов:
Структура цифр кода (DIN IEC 60404-8-1:2005-8):
Буква кода (группы)
+ 1-я цифра (тип материала),
+ 2-я цифра 0 (изотропный) или 1 (анизотропный),
+ 3-я цифра (различные уровни качества).

R – металлические материалы постоянных магнитов, например,
R1 – сплавы алюминия-никеля-кобальта-железа-титана (AlNiCo).

S – керамические материалы постоянных магнитов, например,
S1 – магнитотвердые ферриты.

U – комбинированные материалы постоянных магнитов, например,
U1 – комбинированные магниты из алюминия-никеля-кобальта-железа-титана (AlNiCo),
U2 – комбинированные магниты из редкоземельного элемента – кобальта (RECo)

Стандарты EN по металлургии

Стандартизация металлов

Стандарты DIN
В старейших стандартах сталей, созданных в 1920-х годах, сделан акцент на пределе прочности, гарантируемом изготовителем.

Пример: St 37.11, где St означает сталь, 37 – минимальный предел прочности в кг мм², 11 – категория стали.

С 1943 года в стандарты начали включать описание химического состава.

В третьем варианте стандарта сталей DIN 17 006, который появился в 1949 году, имеется дальнейшее подразделение на нелегированные (конструкционные и углеродистые) и легированные стали (низко- и высоколегированные). Также стало возможным определять режимы обработки и сорта сталей.

Евростандарты ЕС
После создания Европейского Сообщества (ЕС), сорта сталей были классифицированы в 1974 году, в соответствии с Евростандартом 20–74, по химическому составу (закодированная спецификация) на легированные и нелегированные стали, и по назначению – на обычные низкоуглеродистые, высокоуглеродистые и специальные стали. Буквы и числа обозначают параметры механической прочности.

SEW
Новые разработки сталелитейной промышленности утверждаются в нормативах, содержащих спецификации стали и железа (SEW). Они служат основанием для промышленного производства этих материалов и для составления новых стандартов. Европейские нормы DIN EN 10 194 были созданы на основе SEW 092.

Стандарты ISO
Так как ISO (Международная организация по стандартизации) не составляет стандартов для металлов, до частичного введения Евростандарта и/или замены на европейский стандарт EN применялся стандарт DIN 17 006.

Европейские нормы EU EN или DIN EN
После создания Европейского союза (EU), на замену Евростандарта 27-74 в 1989 году пришла система обозначений, установленная DIN EN 10027-1. Она определяет порядок наименований сталей, разделяемых на две главных группы (по механическим или физическим свойствам и по химическому составу). Система присвоения сталям порядковых номеров, согласно DIN 17007, была принята в DIN EN 10027-2. Адаптированный Евростандарт может быть идентифицирован добавлением 10 000 или кратного числа (например, при классификации сталей из EU 20 в DIN EN 10020).

Классификация сталей
(согласно DIN EN 10020:2000-07)
Сталь определяется как сплав железа, содержащий ≤ 2 % углерода (железо с более высоким содержанием углерода классифицируется как чугун). Сталь делится на три категории:

1. Нелегированные стали
Подразделяются на:
- нелегированные высококачественные стали с определенными требованиями (прочность, ковкость, и т.д.);
- Специальные стали с расширенными свойствами (способность к закаливанию, хорошая прочность и/или свариваемость, высокая чистота и т.д.).

2. Нержавеющие стали
Стали, содержащие ≥ 10,5 % хрома и ≤ 1,2 % углерода и различаемые по содержанию никеля, которого бывает либо < 2,5 %, либо ≥ 2,5 %, обладают повышеной коррозионной стойкостью и жаростойкостью.

3. Другие легированные стали
К сталям, которые достигают хотя бы одного из указанных предельных значений, но которые не классифицируются как нержавеющие, относятся:
- легированные высококачественные стали, отвечающие определенным требованиям (прочности, пластичности и т.д.) и, как правило, не предназначенные для закалки, ковки или поверхностного упрочнения;
- легированные специальные стали с улучшенными свойствами (сплав, чистота, специальные условия изготовления и т.д.).

Система обозначений, определяющая порядок наименований сталей
(согласно DIN EN 10027-1)

Основные символы
1. Буквенный код для обозначения области применения или химического состава.
2. Числовой код для обозначения характеристических свойств или состава.

Наименования сталей группы 1
Указывают на область применения, механические или физические свойства (приставка G означает стальное литье):
(GS) S стали общего назначения для строительства;
(GP) P стали для сосудов высокого давления;
L стали для трубопроводов;
E конструкционные стали;
B арматурные стали;
Y горячекатаные стали для предварительно напряженных конструкций;
R рельсовые стали;
H холоднокатанный лист из высокопрочных сталей для холодной деформации;
D лист из мягких (низкоуглеродистых) сталей для холодной деформации;
T упаковочная черная и белая жесть;
M листовая электротехническая сталь и полосовая сталь.

Примеры, группа 1:
S 235 JR.
Конструкционная сталь общего назначения, предел текучести – 235 МПа, работа разрушения образца с надрезом – 27 Дж при 20 °C.
E 335.
Конструкционная сталь, предел текучести – 335 МПа.
H 240 LA.
Микролегированная сталь, предел текучести – 240 МПа.
D C 03 B m.
Холоднокатанный лист, нешлифованный, удлинение при разрыве – 34 %.

Наименования сталей группы 2
Указывают на химический состав:
(GC) C нелегированные стали, Mn < 1 %;
(G) низколегированные и нелегированные стали, Mn ≥ 1 %;
(GX) X высоколегированные стали;

HS быстрорежущая инструментальная сталь.

Примеры, группа 2:
C 15 E.
Нелегированная сталь с содержанием марганца < 1%, указан верхний предел для серы.
X 6 Cr Ni Ti 18 - 10.
Высоколегированная сталь, легирующие элементы указаны в процентах, содержание углерода (0,06 %) умножено на 100.
HS 7 - 4 - 2 - 5.
Быстрорежущая инструментальная сталь, легирующие элементы указаны в процентах в последовательности W-Mo-V-Co.

Дополнительные символы для сталей
В соответствии с требованиями, они определяются для каждой марки сталей, относящихся к группе 1 или 2. Дополнительные символы иногда бывают опущены.
Дополнительные символы сталей группы 1:
A дисперсионно-твердеющая;
E с максимальным содержанием S;
M термомеханически деформированная;
N нормализованная;
Q термообработанная.
Дополнительные символы сталей группы 2:
C с особой пластичностью в холодном состоянии;
D с покрытием, нанесенным горячим способом;
H пустотелая;
L для низких температур;
Q термообработанная;
W стойкая к атмосферным явлениям.
Дополнительные символы для особых требований к стали:
+H с особой прокаливаемостью;
+CU с медным покрытием;
+Z горячее цинкование;
+ZE электролитическое цинкование;
+A мягко отожженная;
+C упрочненная наклепом;
+M термомеханически деформированная;
+Q термообработанная;
+U необработанная

Пример:
D X 54 D +Z275.
Лист из мягких (низкоуглеродистых) сталей для холодной деформации, холодно- или горячекатанный, подвергнутый глубокой вытяжке, с горячим покрытием, оцинкован с двух сторон слоем 275 г/м².

Система обозначений, базирующаяся на присвоении сталям порядковых номеров
(согласно DIN EN 10027-2)

Кроме сокращений, всем сталям присвоены также номера материалов, принятые в основном по DIN.

Номер основной группы материала:
0 – передельный чугун; ферросплав; 1 – сталь; 2 – тяжелые цветные металлы; 3 – легкие сплавы; 4–8 – неметаллы; 9 – для внутреннего использования.

Номер группы стали (выборочно):
00 – чистые обычные низкоуглеродистые стали; 01–03 – высококачественные стали; 08 – высококачественные стали со специальными свойствами; 11, 15 – специальные стали; 40–49 – химически устойчивые стали; 20–85 – специальные стали и т.д.

Например, порядковый номер 43 относится к стали S275J0.

(xx) – дополнительные позиции, в настоящее время не применяются. Разрешено использование дополнительных символов, принятых при обозначениях сталей при помощи сокращений (например, +Z 275 указывает на наличие оцинкованного слоя).
Пример: 1.0143 (xx).

Стандартизация чугунов
Для определения свойств чугунов имют значение структура и форма углерода (содержащего как карбид, так и графит) и структура графита. Согласно следующим стандартам чугуны подразделяются на четыре группы:
DIN EN 1561: чугун с пластинчатым графитом;
DIN EN 1562: ковкий чугун;
DIN EN 1563: чугун с шаровидным графитом;
DIN EN 1564: бейнитный чугун.

Существуют две системы определения чугуна: по номерам материала или по сокращениям.

Система обозначений, базирующаяся на присвоении чугунам порядковых номеров
(согласно DIN EN 1560:1997-08)
Обозначения – буквенно-цифровые.

Первая позиция всегда соответствует европейскому стандарту EN. Это буква J (железо),

за которой идет буква, обозначающая структуру графита:
L пластинчатый графит;
S шаровидный графит;
M углерод отжига;
N свободный графит.

Следующие четыре номера определяют материал.
Основная характеристика (1-я цифра):
1 предел прочности на разрыв;
2 твердость;
3 химический состав.

Номер кода материала (2-я и 3-я цифры): номера 00–99.

Требования к материалу (4-я цифра):
0 отсутствуют специальные требования;
1 выборочный образец литья;
2 образец литья;
7 незавершенная отливка.

Пример:
EN-JL1050.
Европейский стандарт, чугун, пластинчатый графит, предел прочности на разрыв как основная характеристика, номер последовательного отсчета (предел прочности на разрыв – минимум 300 Н/мм²), специальные требования отсутствуют.

Система обозначений, определяющая порядок наименования чугунов
(согласно DIN EN 1560:1997-08)
Обозначения – буквенно-цифровые. Сочетание букв EN-GJ (EN – европейский стандарт, G – отливка, J – железо) сопровождается в каждом конкретном случае буквой, обозначающей структуру графита:
L пластинчатый графит;
M углерод отжига;
N свободный графит;
S шаровидный графит;
V вермикулярный графит;
Y специальная структура.
При необходимости, обозначается микро- или макроструктура:
A аустенит;
B отсутствие обезуглероженной отожженной структуры;
F феррит;
M мартенсит;
P перлит;
W обезуглероженная отожженная структура.
Следующее за буквой через дефис число обозначает механические свойства или химический состав:
– минимальный предел прочности на разрыв в МПа (1 МПа = 1 Н/мм²);
– минимальное растяжение на разрыв в %;
– метод испытания твердости (HB, HV, HR) с величиной твердости;
– определение зависимости температуры от ударной вязкости (RT или LT);
– изготовление образца (S, U или C);
– химический состав (как у сталей).

Пример:
EN-GJL-300.
Европейский стандарт, чугун, пластинчатый графит, минимальный предел прочности на разрыв – 300 МПа.

Цветные металлы и сплавы
Так же как и у материалов из железа, стандарт EN предусматривает два способа обозначения для цветных металлов (NF) и их сплавов:
– система обозначений с помощью химических символов (сокращений);
– номерная система обозначений.

Числовая система обозначений отличается от принятых для стали. Согласно DIN 1700, первая цифра определила основную группу. Цифра 1 была сохранена за сталью. Однако цифра 2, обозначающая тяжелые цветные металлы, цифра 3, относящаяся к легким сплавам, и т.д. были понижены. Цветные металлы определяются, согласно их собственной системе, таким образом, чтобы больше были приняты во внимание различные свойства и требования отдельных материалов группы, например, алюминия, меди или цинковых сплавов.

Из цветных металлов алюминий и его сплавы являются самыми важными. Поэтому, после основного объяснения системы обозначений, приведенная ниже стандартизация только относится только к алюминию.

Система обозначений, определяющая порядок сокращений (химических символов) цветных металлов

Стандарт EN обозначает цветные металлы (NF) согласно следующей базовой системы (пример):

EN A W - Al Cu 4 Pb MG Mn T4.

EN европейский стандарт.

Буквенное обозначение для металла:
A алюминий;
C медь;
M магний.

Буквенное обозначение для обработки:
W деформируемый сплав;
C литой сплав.

Система обозначений с использованием химических символов, например:
Al Cu 4 Pb Mg Mn.

Состояние материала, например: T4.

Металлы в данной системе перечисляются в качестве основных компонентов сплавов с последовательностью убывания процентного содержания.

Специальная система номерного обозначения для алюминия (Al) и сплавов алюминия

Для деформируемых алюминиевых сплавов (согласно DIN EN 573:1994–12), сплав определен четырьмя цифрами (пример 1); для литейных алюминиевых сплавов (согласно DIN EN 1706:1998–06) – пятью цифрами (пример 2).

Пример 1:
EN AW – 2007.
Европейский стандарт, AW – деформируемый алюминиевый сплав, группа сплава (серия 2 для сплава Al-Cu), 0 – оригинальный сплав (1,2 изменений), 07 – обозначение для сплава, содержащего примерно 4% меди, 1,1% свинца, 1% магния и 0,8% марганца.

Пример 2:
EN AC – 45 200.
Европейский стандарт, AC – литой алюминиевый сплав, 45 – группа сплава Al Si 5 Cu, 200 – номер отдельного сплава (в данном случае Al Si 5 Cu 3 Mn).

Кодовые номера для групп сплавов:
1 чистый Al;
2 с медью;
3 с марганцем;
4 с кремнием;
5 с магнием;
6 с магнием-кремнием;
7 с цинком;
8 другие.

Некоторые алюминиевые сплавы могут подвергаться осаждению или искусственному старению. Это увеличивает прочность сплава.

Состояние материала:
O мягкий отжиг;
H упрочнение наклепом;
H14 упрочнение наклепом, $^1/_2$ нагартовки (для листа);
T термообработка;
T6 термообработка на твердый раствор и искуственное старение.

Примеры:
EN 1706 AC - Al Si 9 Mg S T6.
Европейский стандарт DIN EN 1706, алюминиевый литой сплав, алюминий (основной металл), 9% кремния, слабое содержание магния, литье в песчаные формы, состояние материала: термообработка на твердый раствор и искуственное старение.

EN AW – 5754 [Al Mg 3] H16.
Европейский стандарт, деформируемый алюминиевый сплав, группа сплава — 5 (с магнием), номер отдельного сплава — 754, [основной металл — алюминий, 3% магния], состояние материала: упрочнение наклепом, $^3/_4$ нагартовки.

Список литературы
Einfuhrung in die EN-Normen der Metalltechnik (Introduction to EN Metallurgy Standards), 1st Edition 2002,
Karl Manfred Erhardt, Paulernst Seitz,
Holland + Josenhans Verlag.
Order No. 3050.

Свойства металлов

Наименование	Стандарт	Кодовое обозначение	Основные легирующие элементы, среднее значение в % по весу	R_m [1] Н/мм²	R_e [2] Н/мм²	A_5 [3] %	σ_{bw} [4] контр величина Н/мм²	Диаметр опытного образца [5] мм	Примечание
Чугун [6] E [7] в 10^3 Н/мм²: GG 78 ..143 [8]; GGG 160... 80; GTW и GTS 175...195									
Чугун с чешуйчатым графитом (серый чугун)	DIN EN 1561	EN-GJL-200	не стандартизованы	200…300	–	–	90	30	Хрупкий, хорошо поддающийся механической обработке
Модифицированный чугун	DIN EN 1563	EN-GJS-400-15	не стандартизованы	≥ 400	≥ 250	≥ 15	200	25	Более пластичен, чем серый чугун, хорошо обрабатывается
Ковкий чугун, с белой сердцевиной, с черной сердцевиной	DIN EN 1569	GTW-40-05 GTW-35-10	не стандартизованы	≥ 400 ≥ 350	≥ 220 ≥ 200	≥ 5 (A_3) ≥ 10 (A_3)	– –	12 12	Пластичность аналогична чугуну GGG, хорошо обрабатываема
Литая сталь E [7] как у стали	DIN 1681	GS-45	не стандартизованы	≥ 450	≥ 230	≥ 22	210	–	Термически обработанная
Сталь E [7] в 10^3 Н/мм²: Нелегированная и низколегированная 212, аустенитная ≥ 190, высоколегированная ≤ 230									
Строительная сталь нетермообработанная диаметром до 40 мм	DIN EN 10025	S 235 JR E 360	≤ 0,19 C	340 …510 670 …830	≥ 225 ≥ 355	≥ 26 ≥ 11	≥ 170 ≥ 330	– –	Для мало- и сильнонагруженных деталей
Нелегированная листовая и полосовая мягкая сталь	DIN EN 10139	DC 05 LC	Не стандартизованы	270…330	≤ 180	≥ 40 (A_{80})	≥ 130	–	Для деталей, трудно поддающихся холодной штамповке
Оцинкованная электролизом листовая и полосовая сталь	DIN EN 10142	DX 53 D	NHe стандартизованы	≤ 380	≤ 260	≥ 30 (A_{80})	≥ 190	–	Для деталей, подверженных коррозии и плохо поддающихся глубокой вытяжке
Автоматная сталь диаметром 16 …40 мм	DIN EN 10087	11 SMn30 35 S 20	≤ 0,14 C; 1,1 Mn; 0,30 S 0,35 C; 0,9 Mn; 0,20 S	380…570 520…680	– –	– –	≥ 190 ≥ 260	– –	Мягкая автоматная сталь термообработанная

Наименование	Стандарт	Кодовое обозначение	Основные легирующие элементы, среднее значение в % по весу	R_m [1] Н/мм²	R_e [2] Н/мм²	A_5 [3] %	σ_{bW} [4] контр. величина Н/мм²	Диаметр опытного образца [5] мм	Примечание
Термически упрочняемая сталь диаметром до 16 мм	DIN EN 10083	C 45 E 34 Cr 4 42 CrMo 4 30 CrNiMo 8	0,45 C 0,34 C; 1,1 Cr 0,42 C; 1 Cr; 0,2 Mo 0,3 C, 2 Cr; 0,4 Mo; 2 Ni	700 .. 850 900…1100 1100. .1300 1250. 1450	≥490 ≥700 ≥900 ≥1050	≥14 ≥12 ≥10 ≥9	≥280 ≥360 ≥440 ≥500	– – – –	Увеличение способности к закаливанию ▽
Поверхностно и глубинно термообрабатываемая сталь диаметром до 11 мм	DIN EN 10084	C 15 E 16 MnCr 5 17 CrNi 6-6 18 CrNiMo 7-6	0,15 C 0,16 C, 1 Cr 0,17 C, 1,5 Cr; 1,5 Ni 0,18 C, 1,6 Cr; 1,5 Ni; 0,3 Mo	Твердость HV по Виккерсу (контрольная величина) на поверхности 700 . 850 700 .850 700 . 850 700 ..850	в центре 200 . 450 300…450 400 .550 400…550	Для твердых сталей, упрочняемых различными способами термообработки, азотированием и др., результаты испытания образцов на растяжение не относятся к твердым их составляющим			Высокие износостойкость и вибростойкость Увеличение способности к термоупрочнению ▽
Азотируемая термически упрочняемая сталь	DIN EN 10085	31 CrMoV 9 34 CrAlMo 5	0,31 C; 2,5 Cr; 0,2 Mo; 0,15 V 0,34 C; 1,0 Al; 1,15 Cr; 0,2 Mo	700…850 850…1,100	250 400 250 400				Высокие износо- и вибростойкость
Подшипниковая термически упрочняемая сталь	DIN EN ISO 683-17	100 Cr 6	1 C; 1,5 Cr	Твердость 60 ..64 HRC (по Роквеллу)					Высокая износостойкость
Инструментальная нелегированная сталь для холодной обработки	DIN EN ISO 4957	C 80 U	0,8 C	Обычная твердость 60…64 HRC					Закаливание с охлаждением в воде
Легированная холодно-обрабатываемая поверхностно и термически глубинно упрочняемая сталь	DIN EN ISO 4957	90 MnCrV 8 X 153-CrMoV 12 X 210-Cr 12 2,1 C 12 Cr	0,9 C; 2 Mn; 0,3 Cr; 0,1 V 1,53 C, 12 Cr; 0,8 Mo; 0,8 V 2,1 C, 12 Cr	60. .64 HRC 60. .64 HRC 60 64 HR					Закаливание в масле или воде, высокая износостойкость

Горячекатанная термически упрочняемая сталь	DIN EN ISO 4957	X 40 CrMoV 5- 1	0,4 C, 5 Cr; 1,3 Mo, 1 V	43 45 HRC		Для твердых сталей, упрочняемых различным способами термообработки, азотированием и др., результаты испытания образцов на растяжение не относятся к твердым их составляющим			Высокая износостойкость в условиях высоких температур
Поверхностно и глубинно термообрабатываемая с высокой скоростью сталь	DIN EN ISO 4957	HS 6-5-2	0,85 C; 6 W, 5 Mo; 2 V; 4 Cr	61 .65 HRC					
Ферритная термически упрочненная нержавеющая сталь	DIN EN 10088	X 6 Cr 17	≤ 0,08 C; 17 Cr	450.. 600 твердость < 185 HV	≥ 270	≥ 20	200 315		Не упрочняется
Термообрабатываемая мартенситная сталь	DIN EN 10088	X 20 Cr 13 X 46 Cr 13 X 90 CrMoV 18 X 105 CrMo 17	0,20 C; 13 Cr 0,46 C; 13 Cr 0,9 C; 18 Cr, 1,1 Mo; 0,1 V 1,1 C; 17 Cr; 1,0 Mo	твердость около 40 HRC твердость около 45 HRC твердость ≥ 57 HRC твердость ≥ 58 HRC					Увеличение износостойкости
Закаленная аустенитная сталь	DIN EN 10088	X 5 CrNi 18-10 X 8 CrNiS 18-9	≤ 0,07 C, 18 Cr; 9 Ni ≤ 0,10 C; 18 Cr; 9 Ni; 0,3 S	500.. 700 500. 700	≥ 190 ≥ 190	≥ 45 ≥ 35	–	–	Не намагничивается и не упрочняется
Твердые сплавы E = 440 000. .550 000	–	–	W (Ti, Ta)-Карбид + Co	800…1900 HV			Металлокерамические материалы с высоким оротивлением сжатию и износу, обладающие большой хрупкостью, подвергающиеся механической обработке, шлифованию и формованию		
Сверхтяжелые металлы E = 320 000 380 000	–	–	> 90 W, Ni и др.	≥ 650 240…450 HV	≥ 560	≥ 2	Плотность 17. .18,5 г/см³; для центробежных регуляторов, маховиков, балансиров		

[1] Предел прочности на растяжение,
[2] предел текучести (или Rp0,2);
[3] относительное удлинение образца при разрыве;
[4] предел прочности на изгиб;
[5] предел прочности на изгиб приведен для образца из литой стали;
[6] предел усталости всех типов чугуна, зависит от массы и сечения образца;
[7] модуль упругости;
[8] для серого чугуна модуль упругости уменьшается с увеличением напряжения растяжения и остается практически постоянным с увеличением напряжения сжатия

Пружинная сталь

Наименование	Стандарт DIN	Основные легирующие элементы, в % по весу, E и G в Н/мм²	Диаметр, мм	R_m [1] мин., Н/мм²	Z [2] %	σ_b [3] Н/мм²	τ_{kh} [4] Н/мм²	τ_{perm} [5] Н/мм²	Характерные свойства и область применения
Пружинная стальная проволока D [6]	17223 P 1	0,8 C; 0,6 Mn; < 0,35 Si E = 206 000 G = 81 500	1 3 10	2 230 1 840 1 350	40 40 30	1 590 1 280 930	380 [8] 360 [8] 320	1 115 920 675	Для максимально высоких усилий (см. с. 300)
Проволока из пружинной нержавеющей стали	17224	< 0,12 C, 17 Cr; 7,5 Ni E = 185 000 G = 73 500	1 3	2 000 1 600	40 40	1 400 1 130	– –	1 000 800	Пружины из нержавеющей стали
Закаленная в масле стальная проволока для клапанных пружин [6]	17223 P. 2	0,65 C; 0,7 Mn; ≤ 0,30 Si E = 206 000 G = 80 000	1 3 8	1 720 1 480 1 390	45 45 38	1 200 1 040 930	380 [7] 380 [7] 360 [7]	860 740 690	Для условий тяжелых усталостных нагружении
Закаленная в масле легированная стальная проволока для клапанных пружин VD SiCr [6]	–	0,55 C, 0,7 Mn, 0,65 Cr, 1,4 Si E = 200 000 G = 79 000	1 3 8	2 060 1 920 1 720	50 50 40	– – –	430 [7] 430 [7] 380 [7]	1 030 960 860	Для условий наиболее тяжелых усталостных нагружении и высоких температур
Закаленная в масле легированная стальная проволока для клапанных пружин VD Cr V [6]	–	0,7 C, 0,7 Mn; 0,5 Cr; 0,15 V; ≤ 0,30 S E = 200 000 G = 79 000	1 3 8	1 860 1 670 1 420	45 45 40	– – –	470 [7] 470 [7] 400 [7]	930 835 710	Для условий тяжелых усталостных нагружении
Листовая рессорно пружинная сталь Ck 85	17222	0,85 C; 0,55 Mn, 0,25 Si E = 206 000	h ≤ 2.5	1 470	–	1 270	σ_{bh} = 640	–	Высоконагруженные рессоры
Листовая рессорно-пружинная нержавеющая сталь	17224	< 0,12 C, 17 Cr; 7,5 Ni E = 185 000	h ≤ 1	1 370	–	1 230	σ_{bh} = 590	–	Листовые рессоры из нержавеющей стали

[1] Предел прочности на растяжение,
[2] относительное уменьшение поперечного сечения образца при разрыве,
[3] предел прочности на изгиб;
[4] предел прочности при знакопеременном циклическом нагружении при $N \geq 10^7$;
[5] максимальное напряжение при температуре 30°C и относительном удлинении 1 2% в течение 10 ч; для более высоких температур см. с 300,
[6] см. с 300 и 301,
[7] 480 Н/мм² для нагартованных пружин;
[8] приблизительно на 40% больше для нагартованных пружин

Кузовные тонколистовые металлы

Сокращенные наименования		Стандартная толщина листа, мм	Предел тягучести, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Относительное удлинение при разрыве $A_{80\ mm}$ МПа	Свойства, область применения
Холоднокатанные стали EN 10130	DC01	0,6. 2,5	140…280	270.. 410	≥28	Для единичных кузовных деталей
	DC04		140…210	270…350	≥38	Для сложных кузовных деталей, внешняя облицовка (крыша, двери, крылья и другие детали)
	DC06		120.. 170	270…220	≥41	Для очень сложных кузовных деталей, внешняя облицовка (боковые панели, другие детали, 0,7…0,9 мм)
Микролегированные стали EN 10268	H240LA	0,7. .2,5	240…310	≥340	≥27	Для высоконагруженных кузовных деталей со средней степенью деформации
	H320LA		320 . 410	≥400	≥22	
Многофазные стали EN 10336	HT500X (DP 500)	1,0.. 2,5	290 ..370	≥500	≥27	Для высоконагруженных кузовных деталей (поперечные балки, лонжероны)
	HT600X (DP 600)		330. 410	≥600	>21	
	HT700T (TRIP 700)		410…510	≥700	≥24	
	HT900C (CP 900)		580…740	≥880	≥16	
Стали для горячей обработки	22 Mn B5	1,5…2,5	≈1 100	≈1 400	≈8	Кузовные детали для защиты пассажирского салона, предотвращения деформации (центральная стойка, лонжероны)
Алюминий	AlSi 1,2 Mg 0,4 AW-6016	1,0.. 2,5	≈110	≈220	≈25	Детали внешней облицовки, такие как крылья, двери, крышка багажника, капот, другие детали; в основном – 1,25 мм
	AlMg 4,5 Mn 0,4 AW-5182	1,0.. 2,0	≈130	≈270	≈25	Для внутренних перегородок, для деталей, которые не видны; допуск по линиям напряжений

Цветные металлы

Наименование	Обозначение	Средняя паспортная величина составляющих элементов в % по весу	E[1] Н/мм²	R_m[2] мин., Н/мм²	$R_{p0,2}$[3] мин., Н/мм²	σ_{bW}[4] мин., Н/мм²	Свойства, примеры применения
Штампованные медные сплавы (DIN EN 1652...1654, 1758, 12163...12168)							
Высокопроводная медь	EN CW-CuFRTP	99,90 Cu	$128 \cdot 10^3$	200	120[5]	70	Высокая электропроводность
Латунь	EN CW-CuZn 30 R350 EN CW-CuZn 37 R440 EN CW-CuZn 39 Pb3 R430	70 Cu, 30 Zn 63 Cu; 37 Zn 58 Cu, 39 Zn; 3 Pb	$114 \cdot 10^3$ $110 \cdot 10^3$ $96 \cdot 10^3$	350 440 430	200 400 250	110 140 150	Изготавливаемые холодной штамповкой детали
Серебряно-никелевый сплав	EN CW-CuNi 18 Zn 20 R500	62 Cu; 20 Zn; 18 Ni	$135 \cdot 10^3$	500	440		Коррозионная стойкость
Бронза оловянистая	EN CW-CuSn 6 R420	94 Cu; 6 Sn	$118 \cdot 10^3$	420	290	175	Хорошие антифрикционные свойства
Литые медные сплавы (DIN 1705)							
Бронза литая	CuSn 10-C-GS	89 Cu; 10 Sn; 1 Ni	$100 \cdot 10^3$	250	160	90	Коррозионная стойкость, износостойкость; зубчатые колеса
Красная латунь (томпак)	CuSn 7 Zn 4 Pb 7-C-GZ	85 Cu; 7 Sn; 4 Zn; 7 Pb	$95 \cdot 10^3$	260	150	80	
Другие сплавы							
Оловянистый сплав (DIN ISO 4381)	SnSb 12 Cu 6 Pb	80 Sn; 12 Sb; 6 Cu, 2 Pb	$30 \cdot 10^3$	–	60	28	Подшипники скольжения
Цинк литой под давлением (DIN EN 12844)	ZP 0410	95 Zn; 4 Al; Cu 1	$72 \cdot 10^3$	330	250	80	Точное центробежное литье
Сплав для нагревательных элементов (DIN 17470)	NiCr 80 20 NiCr 60 15	80 Ni; 20 Cr 60 Ni; 22 Fe; 17 Cr	– –	650 600	– –	– –	Высокое сопротивление электрическому току
Сплав с высоким электросопротивлением (DIN 17471)	CuNi 44 CuNi 30 Mn	55 Cu; 44 Ni; 1 Mn 67 Cu; 30 Ni; 3 Mn	– –	420 400	– –	– –	

[1] Модуль упругости, справочные данные, [2] предел прочности на растяжение; [3] предел текучести, соответствующий пластической деформации 0,2%, [4] предел прочности на изгиб, [5] наибольшее значение; [6] для отдельных образцов.

Легкие сплавы

Наименование	Средняя паспортная величина составляющих элементов в % по весу	R_m[1] мин., Н/мм²	$R_{p0,2}$[2] мин., Н/мм²	σ_{bW}[3] мин., Н/мм²	Свойства и основная область применения
Штампованные алюминиевые сплавы (DIN EN 458, 485, 515, 573, 754...) с модулем упругости E = 65 000...73 000 Н/мм²					
ENAW-Al 99,5 O	99,5 Al	65	20	40	Мягкость, пластичность, хорошая тепло- и электропроводность, возможность анодирования; полируемость; хорошая водостойкость; способность к упрочнению
ENAW-AlMg 2 Mn 0,8 H111	97 Al, 2 Mg, 0,8 Mn	190	80	90	
ENAW-AlSi 1 MgMn T 6	97 Al; 0,9 Mg; 1 Si; 0,7 Mn	310	260	90	
ENAW-AlCu 4 MgSi (A) T 4	94 Al, 4 Cu; 0,7 Mg; 0,7 Mn; 0,5 Si	390	245	120	
ENAW-AlZn 5,5 MgCu T 6	90 Al; 6 Zn; 2 Mg; 2 Cu; 0,2 Cr	540	485	140	
Литые алюминиевые сплавы[5] **(DIN EN 1706) с модулем упругости** E = 68 000 80 000 Н/мм²					
ENAC-AlSi 7 Mg 0,3 KT 6	89 Al; 7 Si; 0,4 Mg, 0,1 Ti	290	210	80	Для тонкостенных деталей с достаточной усталостной прочностью; устойчивость к воздействию морской воды; возможность анодирования; полируемость, способность к упрочнению; хорошая теплостойкость и усталостная прочность
ENAC-AlSi 6 Cu 4 KF	89 Al; 6 Si, 4 Cu, 0,3 Mn; 0,3 Mg	170	100	60	
ENAC-AlCu 4 Ti KT 6	95 Al, 5 Cu; 0,2 Ti	330	220	90	
ENAC-AlSi 12 Cu 1 (Fe) DF	88 Al; 12 Si, 1 Cu, 1 Fe	240	140	70	
ENAC-AlSi 9 Cu 3 (Fe) DF	87 Al, 9 Si; 3 Cu; 0,3 Mn; 0,3 Mg	240	140	70[6]	
ENAC-AlMg 9 DF	90 Al; 9 Mg, 1 Si; 0,4 Mn	200	130	60[6]	
Магниевые сплавы (DIN 1729, 9715) с модулем упругости E = 40 000 . 45 000 Н/мм²					
MgAl 6 Zn F 27	93 Mg, 6 Al; 1 Zn; 0,3 Mn	270	195	–	Для деталей со средним и высоким уровнем нагружения; возгораемость
EN MC Mg Al 9 Zn 1(A) DF	90 Mg; 9 Al; 0,6 Zn; 0,2 Mn	200	140	50	
Титановые сплавы (DIN 17 850, 17 851, 17 860...17 864) с модулем упругости E = 110 000 Н/мм²					
Ti 1	99,7 Ti	290	180	–	Коррозионная стойкость, достаточная прочность
TiAl 6 V 4 F 89	90 Ti; 6 Al, 4 V	890	820	–	

[1] Предел прочности на растяжение, [2] предел текучести, соответствующий пластической деформации 0,2%; [3] предел прочности на изгиб; [4] наибольшая величина; [5] показатели прочности приведены для образцов и для отливок; [6] показатели предела прочности на изгиб приведены для случая плоского нагружения.

Металлокерамические материалы (PM)[1] для подшипников скольжения

Наименование	Код материала	Допустимый диапазон: Плотность ρ г/см³	Пористость $(\Delta V/V)\cdot 100$ %	Химический состав в % (по массе)	Радиальное сопротивление смятию K^2) N/mm²	Предел текучести, НВ	Плотность ρ г/см³	Характерные примеры: Химический состав в % (по массе)	Радиальное сопротивление смятию K^2) Н/мм²	Предел текучести, соответствующий пластической деформации сжатия $\delta_{d\,0,2}$ Н/мм²	Твердость, НВ[2])	Теплопроводность λ W/mK
Спекание порошка железа	A 00	5,6...6,0	25±2,5	<0,3 C, <1,0 Cu;	>150	>25	5,9	<0,2 другие;	160	130	30	37
	B 00	6,0...6,4	20±2,5	<2 другие; остальное Fe	>180	>30	6,3	остальное Fe	190	160	40	43
	C 00	6,4...6,8	15±2,5		>220	>40	6,7		230	180	50	48
Спекание порошка стали с включением Cu	A 10	5,6...6,0	25±2,5	<0,3 C; 1...5 Cu;	>160	>35	5,9	2,0 Cu;	170	150	40	36
	B 10	6,0...6,4	20±2,5	<2 другие; остальное Fe	>190	>40	6,3	<0,2 другие,	200	170	50	37
	C 10	6,4...6,8	15±2,5		>230	>55	6,7	остальное Fe	240	200	65	42
Спекание порошка стали с включением Cu, C	B 11	6,0...6,4	20±2,5	0,4...1,0 C; 1...5 Cu; <2 другие; остальное Fe	>270	>70	6,3	0,6 C; 2,0 Cu; <0,2 другие; остальное Fe	280	160	80	28
Спекание порошка стали с высоким содержанием Cu	A 20	5,8...6,2	25±2,5	<0,3 C; 15...25 Cu;	>180	>30	6,0	20 Cu;	200	140	40	41
	B 20	6,2...6,6	20±2,5	<2 другие; остальное Fe	>200	>45	6,4	<0,2 другие, остальное Fe	220	160	50	47
Спекание порошка стали с высоким содержанием Cu, C	A 22	5,5...6,0	25±2,5	0,5...2,0 C; 15...25 Cu, <2 другие, остальное Fe	>120	>20	5,7	2,0 C[3]); 20 Cu;	125	100	25	30
	B 22	6,0...6,5	20±2,5		>140	>25	6,1	<0,2 другие; остальное Fe	145	120	30	37
Спекание порошка бронзы	A 50	6,4...6,8	25±2,5	<0,2 C; 9...11 Sn;	>120	>25	6,6	10 Sn;	140	100	30	27
	B 50	6,8...7,2	20±2,5	<2 другие; остальное Cu	>170	>30	7,0	<0,2 другие,	180	130	35	32
	C 50	7,2...7,7	15±2,5		>200	>35	7,4	остальное Cu	210	160	45	37
Спекание порошка бронзы с включением графита[4])	A 51	6,0...6,5	25±2,5	0,5...2,0 C; 9...11 Sn; <2 другие; остальное Cu	>100	>20	6,3	1,5 C[4]); 10 Sn;	120	80	20	20
	B 51	6,5...7,0	20±2,5		>150	>25	6,7	<0,2 другие;	155	100	30	26
	C 51	7,0...7,5	15±2,5		>170	>30	7,1	остальное Cu	175	120	35	32

[1]) В соответствии со стандартом DIN 30 910, 1990 г. издания,
[2]) применительно к подшипнику 10/16 г · 10,
[3]) углерод содержится, главным образом, в виде свободного графита;
[4]) углерод содержится только в виде свободного графита

Металлокерамические материалы (PM)[1] для конструкционных деталей

		Допустимый диапазон				Характерные примеры						
Наименование	Код материала	Плотность ρ г/см³	Пористость $(\Delta V/V)\ 100$ %	Химический состав в % (по массе)	Твердость HB	Плотность ρ г/см³	Химический состав в % (по массе)	Предел прочности на растяжение R_m Н/мм²	$R_{p0,1}$ Н/мм²	Удлинение после разрыва образца A %	Твердость, HB	Модуль упругости $E \cdot 10^3$ Н/мм²
Спекание порошка железа	C 00	6,4 .. 6,8	15±2,5	<0,3 C; <1,0 Cu,	> 35	6,6	<0,5 другие; остальное Fe	130	60	4	40	100
	D 00	6,8 .. 7,2	10±2,5	<2 другие; остальное Fe	> 45	6,9		190	90	10	50	130
	E 00	>7,2	<7,5		> 60	7,3		260	130	18	65	160
Спекание порошка стали с углеродными волокнами	C 01	6,4 .. 6,8	15±2,5	0,3…0,6 C; <1,0 Cu;	> 70	6,6	0,5 C;	260	180	3	80	100
	D 01	6,8 .. 7,2	10±2,5	<2 другие; остальное Fe	> 90	6,9	<0,5 другие, остальное Fe	320	210	3	100	130
Спекание порошка стали с включением Cu	C 10	6,4 .. 6,8	15±2,5	<0,3 C; 1…5 Cu,	> 40	6,6	1,5 Cu;	230	160	3	55	100
	D 10	6,8 .. 7,2	10±2,5	<2 другие; остальное Fe	> 50	6,9	<0,5 другие, остальное Fe	300	210	6	85	130
	E 10	>7,2	<7,5		> 80	7,3		400	290	12	120	160
Спекание порошка стали с включениями Cu, C	C 11	6,4 .. 6,8	15±2,5	0,4 .. 1,5 C; 1…5 Cu;	> 80	6,6	0,6 C; 1,5 Cu,	460	320	2	125	100
	D 11	6,8 .. 7,2	10±2,5	<2 другие; остальное Fe	> 95	6,9	<0,5 другие, остальное Fe	570	400	2	150	130
	C 21	6,4 .. 6,8	15±2,5	0,4 .. 1,5 C; 5…10 Cu; <2 другие; остальное Fe	>105	6,6	0,8 C; 6 Cu, <0,5 другие; остальное Fe	530	410	<1	150	100
Спекание порошка стали с включениями Cu, Ni, Mo	C 30	6,4 .. 6,8	15±2,5	<0,3 C; 1…5 Cu,	> 55	6,6	0,3 C; 1,5 Cu; 4,0 Ni;	390	310	2	105	100
	D 30	6,8 .. 7,2	10±2,5	1 .. 5 Ni; <0,8 Mo;	> 60	6,9	0,5 Mo;	510	370	3	130	130
	E 30	>7,2	<7,5	<2 другие, остальное Fe	> 90	7,3	<0,5 другие, остальное Fe	680	440	5	170	160
Спекание порошка стали с включением P	C 35	6,4 .. 6,8	15±2,5	<0,3 C; <1,0 Cu;	> 70	6,6	0,45 P;	310	200	11	85	100
	D 35	6,8 .. 7,2	10±2,5	0,3…0,6 P, <2 другие; остальное Fe	> 80	6,9	<0,5 другие, остальное Fe	330	230	12	90	130
Спекание порошка стали с включениями Cu, P	C 36	6,4 .. 6,8	15±2,5	<0,3 C; 1…5 Cu;	> 80	6,6	2,0 Cu; 0,45 P,	360	290	5	100	100
	D 36	6,8 .. 7,2	10±2,5	0,3 .. 0,6 P, <2 другие; остальное Fe	> 90	6,9	<0,5 другие; остальное Fe	380	320	6	105	130
Спекание порошка стали с включениями Cu, Ni, Mo, C	C 39	6,4 .. 6,8	15±2,5	0,3…0,6 C; 1…3 Cu;	> 90	6,6	0,5 C; 1,5 Cu, 4,0 Ni,	520	370	1	150	100
	D 39	6,8 .. 7,2	10±2,5	1…5 Ni; <0,8 Mo; <2 others; rest Fe	>120	6,9	0,5 Mo; <0,5 другие; остальное Fe	600	420	2	180	130

[1] В соответствии со стандартом DIN 30 910, 1990 г. выпуска

		Допустимый диапазон				Характерные примеры						
Наименование	Код материала	Плотность ρ г/см³	Пористость ($\Delta V/V$) 100 %	Химический состав в % (по массе)	Твердость, HB	Плотность ρ г/см³	Химический состав в % (по массе)	Предел прочности на растяжение R_m Н/мм²	$R_{p\,0,1}$ Н/мм²	Удлинение после разрыва образца A %	Твердость, HB	Модуль упругости E 10^3 Н/мм²
Спекание порошка нержавеющей стали AISI 316	C 40 D 40	6,4 6,8 6,8 7,2	15±2,5 10±2,5	<0,08 C; 10…14 Ni; 2..4 Mo; 16..19 Cr; <2 другие; остальное Fe	>95 >125	6,6 6,9	0,06 C, 13 Ni; 2,5 Mo; 18 Cr; <0,5 другие, остальное Fe	330 400	250 320	1 2	110 135	100 130
AISI 430	C 42	6,4..6,8	15±2,5	<0,08 C; 16…19 Cr; <2 другие, остальное Fe	>140	6,6	0,06 C; 18 Cr, <0,5 другие, остальное Fe	420	330	1	170	100
AISI 410	C 43	6,4..6,8	15±2,5	0,1…0,3 C; 11…13 Cr; <2 другие, остальное Fe	>165	6,6	0,2 C; 13 Cr; <0,5 другие; остальное Fe	510	370	1	180	100
Спекание порошка бронзы	C 50 D 50	7,2..7,7 7,7 8,1	15±2,5 10±2,5	9..11 Sn; <2 другие; остальное Cu	>35 >45	7,4 7,9	10 Sn, <0,5 другие, остальное Cu	150 220	90 120	4 6	40 55	50 70
Спекание порошка алюминия с включением Cu	D 73 E 73	2,45 2,55 2,55..2,65	10±2,5 6+1,5	4..6 Cu; <1 Mg; <1 Si, <2 другие, остальное Al	>45 >55	2,5 2,6	4,5 Cu; 0,6 Mg; 0,7 Si; <0,5 другие; остальное Al	160 200	130 150	1 2	50 60	50 60

[1]) В соответствии со стандартом DIN 30910, 1990 г. выпуска

Магнитные материалы

Магнитомягкие материалы

Тип магнита	Легирующие компоненты	Статические магнитные свойства											AC test data, 50 Hz[1]		
		Коэрцитивная напряженность магнитного поля $H_{c(max.)}$, А/м Глубина, мм		Минимальная магнитная поляризация (Тл) при напряженности магнитного поля А/м									Точка замера H, А/м	Минимум амплитуды магнитной проницаемости μ. Толщина листа, мм	
	% по массе	0,4. .1.5	>1,5	20	50	100	300	500	800	1600	4000	8000		0,30...0,38	0,15...0,20
A – 240	100 Fe	240	240				1,15	1,30			1,60				
A – 120	100 Fe	120	120				1,15	1,30			1,60				
A – 60	100 Fe	60	60				1,25	1,35			1,60				
A – 12	100 Fe	12	12			1,15	1,30	1,40			1,60				
C1 – 48	0 . 5 Si (типично 2. 4,5)	48	48			0,60	1,10	1,20			1,50				
C1 – 12	0 5 Si (типично 2 .4,5)	12	12			1,20	1,30	1,35			1,50				
C21 – 09	0,4...5 Si (типично 2. .4,5)												1,60	900	750
C22 – 13	0,4. 5 Si (типично 2.. 4,5)												1,60	1300	–
E11 – 60	72 83 Ni	2	4	0,50	0,65	0,70		0,73			0,75		0,40	40 000	40 000
E21	54 ..68 Ni	Не подходит для этой толщины												По согласованию	
E31 – 06	45...50 Ni	10	10	0,50	0,90	1,10		1,35			1,45		0,40	6000	6000
E32	45...50 Ni	Не подходит для этой толщины												По согласованию	
E41 – 03	35.. 40 Ni	24	24	0,20	0,45	0,70		1,00			1,18		1,60	2900	2900
F11 – 240	47...50 Co		240				1,40		1,70	1,90	2,06	2,15	По согласованию между производителем и потребителем		
F11 – 60	47 ..50 Co	60					1,80		2,10	2,20	2,25	2,25			
F21	35 Co	300							1,50	1,60	2,00	2,20			
F31	23...27 Co	300									1,85	2,00			

[1]) Данные относятся только к магнитным кольцам.

Магнитомягкие металлы

Магнитная листовая и полосовая сталь

Тип металла		Номинальная глубина,	Плотность ϱ,	Наибольшая величина потерь магнитных свойств при цикличной модуляции и частоте 50 Гц, Вт/кг			Магнитная поляризация, Тл			Статическая коэрцитивная напряженность магнитного поля H_c, А/м	Магнитная проницаемость	Свойства и область применения
							Наименьшая напряженность магнитного поля, А/м					
Обозначение	Число материала	мм	г/см³	P 1,0	P 1,5	P 1,7	(B25) 2500	(B50) 5000	(B100) 10 000			
M 270–35A	1.0801	0,35	7,60	1,10	2,70	–	1,49	1,60	1,70			
M 330–35A	1.0804	0,35	7,65	1,30	3,30	–	1,49	1,60	1,70			
M 330–50A	1.0809	0,50	7,60	1,35	3,30	–	1,49	1,60	1,70			
M 530–50A	1.0813	0,50	7,70	2,30	5,30	–	1,54	1,64	1,74			Цикличная потеря магнитных свойств
M 800–50A	1.0816	0,50	7,80	3,60	8,00	–	1,60	1,70	1,78			
M 400–65A	1.0821	0,65	7,65	1,70	4,00	–	1,52	1,62	1,72			
M1000–65A	1.0828	0,65	7,80	4,40	10,0	–	1,61	1,71	1,80	≈ 100	≈ 5000	
M 800–100A	1.0895	1,00	7,70	3,60	8,00	–	1,56	1,66	1,75			
M 1300–100A	1.0897	1,00	7,80	5,80	13,00	–	1,60	1,70	1,78			
M 660–50D	1.0361	0,50	7,85	2,80	6,60	–	1,62	1,70	1,79			Для использования в магнитных цепях переменного тока (например, электродвигателях)
M1050–50D	1.0363	0,50	7,85	4,30	10,50	–	1,57	1,65	1,77			
M 800–65D	1.0364	0,65	7,85	3,30	8,00	–	1,62	1,70	1,79			
M1200–65D	1.0366	0,65	7,85	5,00	12,00	–	1,57	1,65	1,77	...300		
							При напряженности магнитного поля 800 А/м (B8)					
M 097–30N	1.0861	0,30	–	–	0,97	1,50	1,75					
M 140–30S	1.0862	0,30	–	–	0,92	1,40	1,78			≈ 1	≈ 30 000	
M 111–30P	1.0881	0,30	–	–	–	1,11	1,85					
M 340–50E	1.0841	0,50	7,65	1,42	3,40	–	1,54	1,62	1,72			
M 560–50E	1.0844	0,50	7,80	2,42	5,60	–	1,58	1,66	1,76	≈ 100	≈ 5000	
M 390–65E	1.0846	0,65	7,65	1,62	3,90	–	1,54	1,62	1,72	...300		
M 630–65E	1.0849	0,65	7,80	2,72	6,30	–	1,58	1,66	1,76			

Материалы для преобразователей и электрических реакторов

Магнитная проницаемость листового сердечника для классов сплавов C21, C22, E11, E31 и E41 для секции тонколистового сердечника EY11

		Минимальная магнитная проницаемость листового сердечника μ_{tam} (min)											
Обозначение по стандарту IEC		C21–09 Толщина в мм				C22–13 Толщина в мм				E11–60 Толщина в мм			
		0,3...0,38	0,15 . 0,2			0,3. .0,38				0,3...0,38	0,15 .0,2	0,1	0,05
YEI 1	–10	630	630			1000				14000	18000	20000	20000
	13	800	630			1000				18000	20000	22400	20400
	14	800	630			1000				18000	22400	22400	22400
	16	800	630			1000				20000	22400	25000	22400
	18	800	630			1000				22400	25000	25000	22400
	20	800	630			1120				22400	25000	25000	25000
	22	800	630			1120							
	25	800	630			1120							
Обозначение по стандарту IEC		E11–100 Толщина в мм				E31–04 Толщина в мм				E31–06 Толщина в мм			
		0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05	0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05	0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05
YEI 1	–10	18000	25000	31500	31500	2800	2800	3150	3150	3550	4000	4500	5000
	13	20000	28000	35500	35500	2800	3150	3150	3550	4000	4500	5000	5000
	14	22400	28000	35500	35500	2800	3150	3150	3550	4000	4500	5000	5000
	16	25000	31500	35500	35500	2800	3150	3150	3550	4500	4500	5000	5000
	18	25000	31500	40000	35500	3150	3150	3550	3550	4500	4500	5000	5000
	20	28000	35500	40000	40000	3150	3150	3550	3550	4500	5000	5000	5000
Обозначение по стандарту IEC		E31–10 Толщина в мм				E41–02 Толщина в мм				E41–03 Толщина в мм			
		0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05	0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05	0,3...0,38	0,15...0,2	0,1	0,05
YEI 1	–10	5600	6300	5600	6300	1600	1800	1800	2000	2000	2240	2500	2240
	13	6300	7100	6300	6300	1800	1800	2000	2000	2240	2240	2500	2240
	14	6300	7100	6300	7100	1800	1800	2000	2000	2240	2240	2500	2240
	16	6300	7100	6300	7100	1800	1800	2000	2000	2240	2500	2500	2240
	18	7100	7100	6300	7100	1800	1800	2000	2000	2240	2500	2500	2240
	20	7100	7100	6300	7100	1800	2000	2000	2000	2240	2500	2500	2240

Материалы для реле постоянного тока

Тип материала		Легирующие элементы в % по массе	Плотность[1] ϱ,	Твердость[1] по Виккерсу	Остаточная магнитная индукция[1],	Магнитная проницаемость[1],	Удельное электросопротивление,	Коэрцитивная напряженность магнитного поля,	Магнитная поляризация в Тл, Наименьшая напряженность магнитного поля, А/м								Свойства и область применения
Обозначение	Число материала								20	50	100	200	300	500	1000	4000	
			г/см³	HV	Тл		Ом · мм²/м	А/м макс.									
Нелегированные стали																	
RFe 160	1.1011				–	–	0,15	160	–	–	–	–	1,15	1,30	–	1,60	Низкая коэрцитивная напряженность магнитного поля
RFe 80	1 1014				1,10	–	0,15	80	–	–	–	1,10	1,20	1,30	1,45	1,60	
RFe 60	1.1015	–	≥ 7,85	макс.	1,20	–	0,12	60	–	–	–	1,15	1,25	1,35	1,45	1,60	
RFe 20	1.1017			150	1,20		0,10	20	–	–	1,15	1,25	1,30	1,40	1,45	1,60	
RFe 12	1 1018				1,20	≈ 20 000	0,10	12	–	–	1,15	1,25	1,30	1,40	1,45	1,60	
Кремнистая сталь																	
RSi 48	1.3840	2,5	7,55	130	0,50	–	0,42	48	–	–	0,60	–	1,10	1,20	–	1,50	Реле постоянного тока и аналогичные устройства
RSi 24	1.3843	–	–	–	1,00	≈ 20 000	–	24	–	–	1,20	–	1,30	1,35	–	1,50	
RSi 12	1.3845	4 Si	7,75	200	1,00	≈ 10 000	0,60	12	–	–	1,20	–	1,30	1,35	–	1,50	
Никелевые стали и сплавы																	
RNi 24	1.3911	≈ 36 Ni	8,2	130. .180	0,45	≈ 5000	0,75	24	0,20	0,45	0,70	–	0,90	1,0	–	1,18	
RNi 12	1.3926	≈ 50 Ni	8,3	130. .180	0,60	≈ 30 000	0,45	12	0,50	0,90	1,10	–	1,25	1,35	–	1,45	
RNi 8	1.3927	≈ 50 Ni	8,3	130. .180	0,60	30000...100000	0,45	8	0,50	0,90	1,10	–	1,25	1,35	–	1,45	
RNi 5	2.4596	70 ... 80 Ni	8,7	120. .170	0,30	≈ 40 000	0,55	5	0,50	0,65	0,70	–	–	–	–	0,75	
RNi 2	2.4595	в малых количествах Cu, Cr, Mo	8,7	120. .170	0,30	≈ 100 000	0,55	2	0,50	0,65	0,70	–	–	–	–	0,75	

1) Нормируемые величины.

Металлокерамические материалы для магнитомягких компонентов

Наименование	Легирующие элементы (за исключением железа) в % по массе	Плотность ϱ_s, г/см³	Пористость p_s, %	Наибольшая коэрцитивная напряженность магнитного поля Hc_{max}, А/м	Магнитная поляризация в Тл при напряженности магнитного поля, А/м				Наибольшая магнитная проницаемость $\mu_{(max)}$	Твердость по Виккерсу, HV	Удельное электросопротивление ϱ, мкОм · м
					500	5000	15000	80000			
S-Fe-175	–	6,6	16	175	0,70	1,10	1,40	1,55	2000	50	0,15
S-Fe-170	–	7,0	11	170	0,90	1,25	1,45	1,65	2600	60	0,13
S-Fe-165	–	7,2	9	165	1,10	1,40	1,55	1,75	3000	70	0,12
S-FeP-150	≈0,45 P	7,0	10	150	1,05	1,30	1,50	1,65	3400	95	0,20
S-FeP-130	≈0,45 P	7,2	8	130	1,20	1,45	1,60	1,75	4000	105	0,19
S-FeSi-80	≈3 Si	7,3	4	80	1,35	1,55	1,70	1,85	8000	170	0,45
S-FeSi-50	≈3 Si	7,5	2	50	1,40	1,65	1,70	1,95	9500	180	0,45
S-FeNi-20	≈50 Ni	7,7	7	20	1,10	1,25	1,30	1,30	20 000	70	0,50
S-FeNi-15	≈50 Ni	8,0	4	15	1,30	1,50	1,55	1,55	30 000	85	0,45
S-FeCo-100	≈50 Co	7,8	3	100	1,50	2,00	2,10	2,15	2000	190	0,10
S-FeCo-200	≈50 Co	7,8	3	200	1,55	2,05	2,15	2,20	3900	240	0,35

Магнитомягкие ферриты

Тип феррита	Начальная магнитная проницаемость[1] μ_i, ± 25 %	Потеря магнитных свойств $tg\delta/\mu_i$[2], 10^{-6}	МГц	Амплитудные потери плотности магнитного потока[3], мВт/г	Амплитуда магнитной проницаемости[4], μ_a	Температура Кюри[5][6] Θ_c, °C	Частота для $0{,}8 \cdot \mu_i$[6], МГц	Характерные свойства и область применения
Материалы, в основном, с разомкнутыми магнитными цепями								
C 1/12	12	350	100	–	–	> 500	400	Начальная магнитная проницаемость; высокое удельное электросопротивление, (10^0...10^5 Ом · м в сравнении с металлами, у которых 10^{-7}...10^{-6} Ом · м) малые потери вихревых токов; для устройств связи (катушки, преобразователи)
D 1/50	50	120	10	–	–	> 400	90	
F 1/250	250	100	3	–	–	> 250	22	
G 2/600	600	40	1	–	–	> 170	6	
H 1/1200	1200	20	0.3	–	–	> 150	2	
Материалы, в основном, с замкнутыми магнитными цепями								
E 2	60 ... 160	80	10	–	–	> 400	50	
G 3	400 ... 1200	25	1	–	–	> 180	6	
J 4	1600 ... 2500	5	0,1	–	–	> 150	1,5	
M 1	3000 ... 5000	5	0,03	–	–	> 125	0,4	
P1	5000 ... 7000	3	0,01	–	–	> 125	0,3	
Материалы для силовых элементов								
W 1	1000 ... 3000	–	–	45	1200	> 180	–	
W 2	1000 ... 3000	–	–	25	1500	> 180	–	

[1] Нормируемые величины;
[2] потеря материалом магнитных свойств в зависимости от частоты при низкой плотности магнитного потока (B < 0,1 мТл);
[3] потери магнитных свойств при высокой плотности магнитного потока; замеряются предпочтительно при f = 25 кГц, B = 200 мТл, Θ = 100°C;
[4] магнитная проницаемость при строго синусоидальном магнитном поле; замеряется при $f \leq 25$ кГц, B = 320 мТл, Θ = 100°C;
[5] температура Кюри Θ_c, при которой начальная магнитная проницаемость μ_i снижается ниже 10% от значения при температуре 25°C;
[6] нормируемые величины.

Материалы для постоянных магнитов

Наименование			Химический состав в % по весу							Плотность	$(BH)_{max}$[2]	Остаточная магнитная индукция	Коэрцитивная напряженность[2]		Относительная постоянная магнитная проницаемость[1]	Температура Кюри[1]	Температурный коэффициент поляризации	Температурный коэффициент коэрцитивности[1][3]	Способ изготовления и область применения
Обозначение	Номер по DIN	Номер IEC	Al	Co	Cu	Nb	Ni	Ti	Fe				плотности магнитного потока H_{CB}, кА/м	поляризации H_{CJ}, кА/м	μ_p	T_C K	% K	% K	
										г/см³	кДж/м³	мТл							
Металлические магниты																			
Изотропные																			
AlNiCo 9/5	1.3728	R 1–0–3	11...13	0...5	2...4	–	21...28	0...1	остаток	6,8	9,0	550	44	47	4,0...5,0	1030		+ 0,03	Изготавливаются литьем или спеканием; магниты со связующим веществом прессуются или выплавляются под давлением с последующим шлифованием; наибольшая температура применения 400–500°C
AlNiCo 18/9	1.3756	–	6...8	24...34	3...6	–	13...19	5...9	ток	7,2	18,0	600	80	86	3,0...4,0		– 0,02		
AlNiCo 7/8p	1.3715	R 1–2–3	6...8	24...34	3...6	–	13...19	5...9		5,5	7,0	340	72	84	2,0...3,0	1180		– 0,07	
Анизотропные																			
AlNiCo 35/5	1.3761	–	8...9	23...26	3...4	0...1	13...16	–	остаток	7,2	35,0	1120	47	48	3,0...4,5				
AlNiCo 44/5	1.3757	R 1–1–2	8...9	23...26	3...4	0...1	13...16	–		7,2	44,0	1200	52	53	2,5...4,0	1030		+ 0,03	
AlNiCo 52/6	1.3759	–	8...9	23...26	3...4	0...1	13...16	–		7,2	52,0	1250	55	56	1,5...3,0		– 0,02		
AlNiCo 60/11	1.3763	R 1–1–6	6...8	35...39	2...4	0...1	13...15	4...6		7,2	60,0	900	110	112	1,5...2,5	1180		– 0,07	
AlNiCo 30/14	1.3765	–	6...8	38...42	2...4	0...1	13...15	7...9		7,2	30,0	680	136	144	1,5 ... 2,5				
			Pt	Co															
PtCo 60/40	2.5210	R2–0–1	...77...78	20...23						15,5	60	600	350	400	1,1	800	–0,01 –0,02	– 0,35	
			V	Co	Cr	Fe													
FeCoVCr 11/2	2.4570	R 3–1–3	8...15	51...54	0...4	остаток				–	11,0	800	24	24	2,0...8,0				
FeCoVCr 4/1	2.4571	–	3...15	51...54	0...6					–	4,0	1000	5	5	9,0...25,0	1000	– 0,01	≈ 0	
магниты RECo типа $RECo_5$																			
RECo 80/80	–	R 5–1–1								8,1	80	650	500	800					
RECo 120/96	–	R 5–1–2								8,1	120	770	590	960	1,05	1000	–0,05	– 0,3	
RECo 160/80	–	R 5–1–3								8,1	160	900	640	800					
RECo 165/50	–	R 5–1–11								8,2	165	950	440	500	1,1	1100	0,03	–0,02	
RECo 180/90	–	R 5–1–13								8,2	180	1000	680	900	1,1	1100	0,03	–0,02	
RECo 190/70	–	R 5–1–14								8,2	190	1050	560	700	1,1	1100	0,03	–0,02	
RECo 48/60p	–	R 5–3–1								5,2	48	500	360	600	1,05	1000	–0,05	–0,3	

Наименование			Химический состав в % по весу							Плотность ϱ[1]	$(BH)_{max}$[2]	Остаточная магнитная индукция[2]	Коэрцитивная напряженность[2]		Относительная постоянная магнитная проницаемость[1]	Температура Кюри[1]	Температурный коэффициент поляризации[1][3]	Температурный коэффициент коэрцитивности[1][3]	Способ изготовления и область применения
													плотности магнитного потока	поляризации					
Обозначение	Номер по DIN	Номер по IEC	Al	Co	Cu	Nb	Ni	Ti	Fe	г/см³	кДж/м³	мТл	H_{CB}, кА/м	H_{CJ}, кА/м	μ_p	T_C, К	% К	% К	
CrFeCo 12/4	–	R 6–0–1								7.6	12	800	40	42	5,5...6,5	1125	–0,03	–0,04	
CrFeCo 28/5	–	R 6–1–1								7,6	28	1000	45	46	3...4	1125	–0,03	–0,04	
REFe 165/170	–	R 7–1–1								7,4	165	940	700	1700	1,07	583	–0,1	–0,8	
REFe 220/140	–	R 7–1–6								7,4	220	1090	800	1400	1,05	583	–0,1	–0,8	
REFe 240/110	–	R 7–1–7								7,4	240	1140	850	1100	1,05	583	–0,1	–0,8	
REFe 260/80	–	R 7–1–8								7,4	260	1180	750	800	1,05	583	–0,1	–0,8	

Наименование			Плотность[1]	$(Bit)_{max}$[2]	Остаточная магнитная индукция	Коэрцитивная напряженность[2]		Постоянная магнитная проницаемость[1]	Температура Кюри[1]	Температурный коэффициент поляризации[1]	Температурный коэффициент коэрцитивности	Способ изготовления и область применения
						плотности магнитного потока	поляризации					
Обозначение	Номер по DIN	Номер по IEC	г/см³	кДж/м³	мТ	H_{CB}, кА/м	H_{CJ}, кА/м	μ_p	T_C, К	$TK(J_s)$, % К	$TK(H_C)$, % К	
Керамические магниты												
Изотропные												
тв. ферриты 7/21	1.3641	S 1–0–1	4.9	6,5	190	125	210	1,2	723	– 0,2	0,2 ... 0,5	Изготавливаются спеканием; магниты с синтетическим связующим веществом изготавливаются прокатыванием или прессованием, с последующим шлифованием
тв. ферриты 3/18р	1.3614	S 1–2–2	3,9	3,2	135	85	175	1,1				
Анизотропные												
тв. ферриты 20/19	1.3643	S 1–1–1	4,8	20,0	320	170	190	1,1	723	– 0,2	0,2 ... 0,5	
тв. ферриты 20/28	1.3645	S 1–1–2	4,6	20,0	320	220	280	1,1				
тв. ферриты 24/23	1.3647	S 1–1–3	4,8	24,0	350	215	230	1,1				
тв. ферриты 25/25	1.3651	S 1–1–5	4,8	25,0	370	230	250	1,1				
тв. ферриты 9/19р	1.3616	S 1–3–1	3,4	9,0	220	145	190	1,1				
тв. ферриты 10/22р	–	S 1–3–2	3,5	10,0	230	165	225	1,1				
По спецификации Bosch (не стандартизованы)												
RBX HC 375				23	350	260	360					
RBX 370				25	360	240	260					
RBX 380K				27	380	280	300					
RBX 380			4,7 . 4,9	27	380	255	260					
RBX 400				32	400	250	260					
RBX 410K				32	405	290	300					
RBX 420				35	420	255	260					
RBX HC 410				30	395	290	340					

[1] Нормируемые величины. [2] Наименьшее значение. [3] В диапазоне температур 273...373 К.

По спецификации Bosch (не стандартизованы)

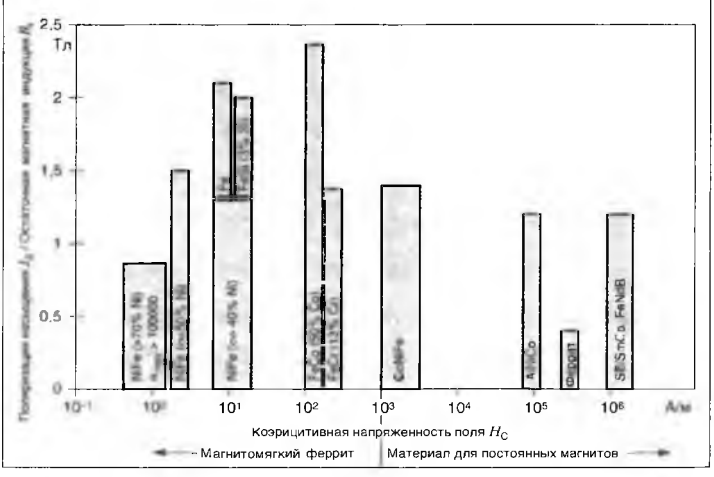
Обозначение	Плотность[1] ρ г/см³	$(BH)_{max}$[2] кДж/м³	Остаточная магнитная индукция[2] B_r mT	Коэрционная напряженность[2] плотности магнитного потока H_{cB} kA/m	поляризации H_{cJ} kA/m
RBX HC 370		25	360	270	390
RBX HC 380		28	380	280	370
RBX 380 K		28	380	280	300
RBX 400		30	400	255	260
RBX 400 K	4.7 ..4.9	31	400	290	300
RBX HC 400		29	380	285	355
RBX 420		34	420	255	270
RBX 410 K		33	410	305	330
RBX HC 410		30	395	290	340
RBX 420 S		35	425	260	270
RBX HC 400 N		28	380	280	390

[1]) Нормируемые величины. [2]) Наименьшее значение.

Сравнение материалов для постоянных магнитов и магнитомягких ферритов

Диапазон магнитных характеристик некоторых широко используемых кристаллических материалов

Материал магнита	Коэрцитивная напряженность поля H_C, А/м	Поляризация насыщения J_S, Тл	Остаточная магнитная индукция B_r, Тл	Магнитная проницаемость
Магнитомягкий феррит	низкая 0,3…400	высокая 0,9…2,4	в зависимости от применения	высокая <500 000
Материал для постоянных магнитов	высокая $5\cdot10^4$…$2\cdot10^6$	высокая 0,45…1,4	высокая 0,4 ..1,25	высокая 1,1…5



Материалы для пайки

Тип сплава	Обозначение (согласно DIN EN ISO 3677)	Содержание основных элементов в % по массе	Температурный диапазон плавления сплава, °C	Свойства, примеры применения
Мягкий припой (выборка из DIN 1707-100 и DIN EN 29453)				
Оловянистосвинцовый мягкий припой	S-Sn 63 Pb 37 S-Sn 60 Pb 40	62,5-63,5 Sn; остальное – Pb 59,5-60,5 Sn; остальное – Pb	183 183 .190	Для пайки оплавлением припоя электрических цепей и контуров, при монтаже приборного щитка
Оловянистосвинцовый припой с добавлением Ag или Cu	S-Sn 62 Pb 36 Ag 2	61,5-62,5 Sn; 1,8-2,2 Ag; остальное – Pb	178…190	Для пайки оплавлением припоя электрических цепей
	S-Sn 60 Pb 38 Cu 2	59,5-60,5 Sn, 1,5-2,0 Cu; остальное – Pb	183…190	Для пайки проводов в электропромышленных изделиях с использованием меди, медных сплавов и железа
	S-Sn 60 Pb 40 CuP	59,5-60,5 Sn, 0,1-0,2 Cu; 0,001-0,004 P; остальное – Pb	183.. 190	Для пайки погружением проводов в электропромышленных изделиях с использованием меди и медных сплавов
Свинцовооловянистый мягкий припой	S-Pb 92 Sn 8 S-Pb 60 Sn 40	7,5-8,5 Sn; остальное – Pb 39,5-40,5 Sn; остальное – Pb	280…305 183…235	Для лужения, мягкой пайки металлических листовых конструкций, электродвигателей, радиаторов
	S-Pb 78 Sn 20 Sb 2	19,5-20,5 Sn; 0,5-3,0 Sb; остальное – Pb	185.. 270	Для пайки деталей кузова автомобилей. Для мягкой пайки медных элементов радиатора
Безсвинцовистый мягкий припой	S-Sn 96 Ag 4 S-Sn 96 Ag 4 Cu 1 [1]	3,5-4,0 Ag; остальное – Sn 3,5-4,0 Ag; 0,5-1,0 Cu; остальное – Sn	221 217.. 220	Для пайки оплавлением припоя электрических цепей
	S-Sn 99 Cu 1	0,45-0,90 Cu; остальное – Sn	230…240	Для плавки печатных плат
	S-Bi 57 Sn 43	42,5-43,5 Sn; остальное – bi	138	Для пайки оплавлением и пайкой волной припоя печатных плат
Специальный мягкий припой	S-Sn 95 Sb 5	4,5-5,5 Sb; остальное – Sn	230. .240	Для пайки медных элементов в электроизделиях и для монтажа водных трубопроводов
	S-Sn 50 In 50	49,5-50,5 Sn; остальное – In	117…125	Для соединения стекла и металла
	S-Bi 57 In 26 Sn 17 [1]	57 bi; 26 In; остальное – Sn	79	Для мягкой пайки чувствительных к нагреву элементов; для пайки предохранителей
	S-Sn 90 Zn 10 S-Zn 95 Al 5	8,0-15,0 Zn; остальное – Sn 4,0-6,0 Al; остальное – Zn	200…250 380 . 390	Для пайки алюминиевых и медных деталей без их намагничивания

[1]) Нет перечисленных в DIN 1707-100 или DIN EN 29453.

Тип сплава	Обозначение	Содержание основных элементов в % по массе	Температурный диапазон плавления сплава, °C	Наименьшая рабочая температура[1], °C	Свойства и область применения
Твердые припои для обычной и высокотемпературной пайки (выборка из DIN 8513)					
Твердый припой на основе алюминия	L–AlSi 12	12 Si; остальное Al	575 .. 590	590	Пайка твердым припоем алюминия и его сплавов
	L–AlSi 10	10 Si; остальное Al	575 .. 595	595	
	L–AlSi 7.5	7.5 Si; остальное Al	575 .. 615	615	
Твердый припой на базе серебра с содержанием его менее 20%	BCu 75AgP 643	18 Ag; 7,25 P; ост–ое Cu	643	650	Пайка твердым припоем медных изделий
	L–Ag 15 P	15 Ag; 5 P; ост–ое Cu	650 .. 800	710	
	L–Ag 5	5 Ag; 55 Cu; 0,2 Si; ост–ое Zn	820 .. 870	860	Соединение пайкой стали, меди, никеля, никелевых сплавов
Твердый припой на основе серебра с содержа–нием его более 20%	L–Ag55Sn	55 Ag; 22 Cu; 5 Sn; ост–ое Zn	620 .. 660	650	Пайка твердым припоем под слоем флюса стали, меди и медных сплавов, никеля и никелевых сплавов
	L–Ag44	44 Ag; 30 Cu; остальное Zn	675 .. 735	730	
	L–Ag49	49 Ag; 16 Cu; 7,5 Mn; 4,5 Ni; остальное Zn	625 .. 705	690	Пайка твердых металлов, стали, вольфрама, молибдена, тантала под слоем флюса
	BAg 60 CuIn 605–710	60 Ag; 13 In; остальное Cu	605 .. 710	710	Пайка в вакууме или под защитной газовой оболочкой меди, никеля, стали
	BAg 60 CuSn 600–700	60 Ag; 10 Sn; остальное Cu	600 .. 720	720	
	L–Ag 72	72 Ag; остальное Cu	780	780	
	BCu 58 AgNi 780–900	40 Ag; 2 Ni, остальное Cu	780 .. 900	900	
	BAg 68 CuPd 807–810	68 Ag, 5 Pd; остальное Cu	807 .. 810	810	Пайка твердых металлов, стали, вольфрама, молибдена, тантала под слоем флюса
	BAg 54 PdCu 901–950	54 Ag; 21 Pd; остальное Cu	901 .. 950	950	
	BAg 95 Pd 970–1010	95 Ag; остальное Pd;	970 .. 1010	1010	
	BAg 64 PdMn 1180–1200	64 Ag; 3 Mn; остальное Pd	1180 .. 1200	1200	
	L–Ag 56 InNi	56 Ag; 14 In; 4 Ni; ост–ое Cu	620 .. 730	730	Пайка твердым припоем хрома и хромоникеле–вых сталей в вакууме и под защитной газовой оболочкой
	L–Ag 85	85 Ag; остальное Mn	960 .. 970	960	
Твердый припой на основе меди	BCu 86 SnP 650–700	6,75 P; 7 Sn; остальное Cu	650 .. 700	690	Пайка меди и медных сплавов под слоем флюса

[1] В зависимости от выполняемой операции.

Материалы для пайки (окончание)

Тип сплава	Обозначение	Содержание основных элементов в % по массе	Температурный диапазон плавления сплава, °C	Наименьшая рабочая температура[1], °C	Свойства и область применения
Твердый припой на основе меди (продолжение)	L–CuP 8	8 P; остальное Cu	710 .. 740	710	Пайка медных деталей под флюсом, не пригоден для пайки железа и никелевых сплавов
	L–CuZn 40	60 Cu; 0,2 Si; ост–ое Zn	890 .. 900	900	Пайка стали, меди, никеля и его сплавов под флюсом
	L–CuSn 6	6 Sn макс.; 0,4 P; ост–ое Cu	910 .. 1040	1040	Пайка стали в вакууме или под защитной газовой оболочкой
	L–SFCu	100 Cu	1083	1100	
	BCu 86 MnNi 970–990	2 Ni; 12 Mn; остальное Cu	970 .. 990	990	Пайка твердых металлов, стали, вольфрама, молибдена, тантала в вакууме или под защитной газовой оболочкой и под давлением
	BCu 87 MnCo 980–1030	3 Co; 10 Mn; остальное Cu	980 .. 1030	1020	
	BCu 96.9 NiSi 1090–1100	0,6 Si; 2,5 Ni; остальное Cu	1090 .. 1100	1100	
Твердый припой на основе никеля	L–Ni6	11 P; остальное Ni	880	925	Пайка никеля, кобальта и их сплавов, нелегированных, низко– и высоколегированных сталей в вакууме или в атмосфере водорода
	L–Ni1	3 B; 14 Cr; 4.5 Fe; 4,5 Si; остальное Ni	980 .. 1040	1065	
	L–Ni5	19 Cr; 10 Si; остальное Ni	1080 .. 1135	1150	
Твердый припой с золотом	BAu 80 Cu 910	20 Cu; остальное Au	910	910	Пайка меди, никеля, стали в вакууме или под защитной газовой оболочкой
	BAu 82 Ni 950	18 Ni; остальное Au	950	950	Пайка вольфрама, молибдена, кобальта, никеля, стали в вакууме или в газовой оболочке
Активный твердый припой, включающий титан	–	72,5 Ag; 19,5 Cu; 5 In; ост–ое Ti	730 .. 760	850	Прямая пайка неметаллизированных керамических материалов друг с другом или со сталью в вакууме или в атмосфере аргона
	–	70,5 Ag; 26,5 Cu; ост–ое Ti	780 .. 805	850	
	–	96 Ag; остальное Ti	970	1000	

[1] В зависимости от выполняемых операций.

Электрические свойства

Электросопротивление при температуре 20°C
(сопротивление провода длиной 1 м и поперечным сечением 1 мм²)

Электросопротивление в значительной мере зависит от чистоты металла проводника. Усредненный температурный коэффициент α соответствует диапазону температур от 0 до 100°C. Электросопротивление при температуре t°C определяется по формуле: $\varrho_t = \varrho_{20}\,[1 + \alpha\,(t - 20°C)]$.
На с. 137 приведен расчет температуры нагрева электрообмотки в зависимости от ее сопротивления:

1 Ом · мм²/м = 1 мкОм · м, 1 См · м/мм² = 1 МСм/м (См – Сименс)

Наименование		Удельное электросопротивление ϱ, мкОм м	Электропроводность $\gamma = 1/\varrho$, МСм/м	Усредненный температурный коэффициент, $\alpha \times 10^{-3}$, 1/°C	Наибольшая рабочая температура, °C
Алюминий (мягкий)	Al 99,5	0,0265	35	3,8	–
Алюминиевые сплавы	E – AlMgSi	< 0,0328	> 30,5	3,8	–
Висмут		1,07	0,8	4,54	–
Латунь	CuZn 39 Pb 3	0,0667	15	2,33	–
	CuZn 20	0,0525	19	1,60	–
Бронза	CuBe 0,5	0,04 . 0,05	20 ... 25	–	300
Кадмий		0,068	13	–	–
Угольные щетки, без металл. присадки		10 ... 200	0,1 ... 0,05	–	–
с металлической присадкой		0,05 . . 30	20 ... 0,03	–	–
Медь мягкая		0,01754	57	3,9	–
Твердая (холоднотянутая)		0,01786	56	3,9	–
Сплав золота с хромом	Cr 2,05	0,33	3,03	± 0,001	–
Чистое золото		0,023	45	4	–
Серый чугун		0,6 ... 1,6	0,62 ... 1,67	1,9	–
Сплав для нагревательных	CrAl 20 5	1,37	0,73	0,05	1200
элементов [1]	NiCr 30 20	1,04	0,96	0,35	1100
	NiCr 60 15	1,13	0,88	0,15	1150
	NiCr 80 20	1,12	0,89	0,05	1200
Свинец	Pb 99,94	0,206	4,8	4	–
Электротехническая листовая сталь	I	0,21	4,76	–	–
Электротехническая листовая сталь	IV	0,56	1,79	–	–
Ртуть		0,941	1,0386	0,9	–
Молибден		0,052	18,5	4,7	1600[3]
Никелесеребряный сплав	CuNi 12 Zn 24	0,232	4,3	–	–
Никель	Ni 99,6	0,095	10,5	5,5	–
Платина		0,106	10,2	3,923	–
Сплавы с высоким	CuMn 12 Ni	0,43	2,33	± 0,01	140
омическим	CuNi 30 Mn	0,40	2,50	0,14	500
сопротивлением[2]	CuNi 44	0,49	2,04	± 0,04	600
Чистое серебро		0,016	66,5	4,056	–
Сталь	C 15	0,14 ... 0,16	7,15	–	–
Тантал		0,124	8,06	3,82	–
Олово		0,114	8,82	4,4	–
Вольфрам		0,056	18,2	4,82	–
Цинк		0,06	16,67	4,17	–

[1] DIN 17 470; [2] DIN 17 471;
[3] под защитной газовой оболочкой или в вакууме.

Свойства неметаллических материалов

Изоляционные материалы

Электрические свойства

Свойства изоляционных материалов в значительной степени зависят от их чистоты, однородности, технологии обработки, старения, внешних условий: влажности и температуры. Данные, приведенные ниже в таблице, служат в качестве справочных по результатам испытаний образцов новых материалов при комнатной температуре и нормальной влажности. Продолжительность воздействия переменного тока частотой 50 Гц на образец толщиной 3 мм составляла 1 мин. Коэффициент потери изолирующих свойств материалов tg δ равен соотношению активной и реактивной мощности; в США коэффициент потери = $\varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta$.

Материал	Относительная диэлектрическая постоянная ε_r, при частоте 800 Гц (для воздуха = 1)	Коэффициент потери изолирующих свойств tg δ		Удельное сопротивление, 10^{10} Ом · м, показатель n	Диэлектрическая напряженность поля, кВ/мм	Сопротивление прохождению тока, в соответствии с DIN 53 480, класс
		при частоте 800 Гц, x 10^{-3}	при частоте 10^6 Гц, x 10^{-3}			
Кварцевое стекло	3,5 ... 4,2	0,5	0,2	14 ... 16	25 ... 40	KA 3 c
Кремний	5 ... 8	≈ 4	≈ 4	10 ... 14	20 ... 60	KA 3 c
Мягкая резина	2 ... 14	0,2 ... 100	–	2 ... 14	15 ... 30	KA 1 ... KA 3 c
Парафин, воск	1,9 ... 2,3	< 0,3	< 0,3	13 ... 16	10 ... 30	–
Полиамид	8 ... 14	20 ... 200	20 ... 200	6 ... 12	10 ... 50	KA 3 b, KA 3 c
Поливинилхлорид	3,3 ... 6,5	15 ... 150	10 ... 100	10 ... 14	15 ... 50	KA 3 b
Поликарбонат	3	1,0	10	14 ... 16	25	KA 1
Полиметил	3,1 ... 3,4	40	20	> 13	30	KA 3 c
Полипропилен	2,3	< 0,5	< 0,5	> 15	–	KA 3 b
Полистирол	2,5	0,1	0,1	14	40	KA 2, KA 1
Политетрафторэтилен	2	0,1 ... 0,5	0,1 ... 0,5	13 ... 15	50	KA 3 c
Полиэтилен	2,3	0,2 ... 0,6	0,2 ... 0,6	> 15	≈ 80	KA 3 c
Полиэфир	3 ... 7	3 ... 100	6 ... 60	8 ... 14	6 ... 25	KA 3 c
Слюда и миканит	5 ... 8	0,1 ... 1	0,2	13 ... 15	60	KA 3 c
Стеатит (мыльный камень)	5,5 ... 6,5	1 ... 3	0,3 ... 2	10 ... 12	20 ... 45	KA 3 c
Твердый фарфор	5 ... 6,5	≈ 15	6 ... 12	≈ 9	30 ... 40	KA 3 c
Титановая керамика	12 ... 10 000	–	0,05 ... 100	–	2 ... 30	–
Трансформаторное осушенное масло	2 ... 2,7	≈ 1	≈ 10	11 ... 12	5 ... 30	–
Фенольная смола с неорганическим заполнителем	5 ... 30	30 ... 400	50 ... 200	6 ... 11	5 ... 30	KA 1
Фенольная смола с органическим заполнителем	4 ... 9	50 ... 500	50 ... 200	6 ... 10	5 ... 20	KA 1
Целлюлоза ацетатная	4,7 ... 5,8	17 ... 24	48 ... 66	11 ... 13	32	–
Эпоксидная смола и компаунд	3,2 ... 5	2 ... 30	2 ... 60	10 ... 15	6 ... 15	KA 3 b, KA 3 c

Керамические материалы

Материал	Химический состав	г/см³	$\sigma_{вв}$[2], МН/м²	$\sigma_{дв}$[3], МН/м²	E[4], ГН/м²	α[5], 10^{-6}/К	λ[6], Вт/м · м	c[7], кДж/кг	ϱ_D[8], Ом · см	ε_r[9]	tg δ[10], 10^{-4}
Графит	C > 99,7 %	1,5 . . 1,8	5 ... 30	20 ... 50	5 ... 15	1,6 ... 4,0	100 ... 180	–	10^{-3}	–	–
Диоксид титана	TiO_2	3,5 . . 3,9	90 ... 120	300	–	6,0 . . 8,0	3 ... 4	0,7 ... 0,9		40 ... 100	8
Диоксид циркония, частично стабилизированный, PSZ	ZrO_2 > 90 % остальное Y_2O_3, MgO	5,7 . . 6,0	500 ... 800	1800 ... 2100	200	9,0 ... 11,0	2 ... 3	0,4	10^8	–	–
Карбид бора	B_4C	2,5	300 ... 500	2800	450	5,0	30 ... 60	–	10^{-1} ... 10^2	–	–
Карбид кремния спекаемый, горячепрессованный, HPSiC	SiC > 99 %	3,1 . . 3,2	450 ... 650	> 1500	420	4,0 ... 4,5	100 ... 120	0,8	10^3	–	–
Карбид кремния спекаемый, горячепрессованный, SSiC	SiC > 98 %	3,1 . . 3,2	400 . . 450	> 1200	400	4,0 . . 4,5	90 ... 120	0,8	10^3	–	–
Карбид кремния спекаемый, горячепрессованный, SiSiC	SiC > 90 % + Si	3,0 ... 3,1	300 . . 400	> 2200	380	4,2 . . 4,3	100 ... 140	0,8	10 ... 100	–	–
Карбид титана	TiC	4,9	–	–	320	7,4	30	–	$7 \cdot 10^{-5}$	–	–
Кордиерит, например, KER 410, 520	$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	1,6 ... 2,1	40 ... 200	300	70 ... 100	2,0 ... 5,0	1,3 ... 2,3	0,8	> 10^{11}	5,0	70
Нитрид алюминия	AlN > 97 %	3,3	250 . . 350	1100	320 ... 350	5,1	100 ... 220	0,8	> 10^{14}	8,5 ... 9,0	3 ... 10
Нитрид кремния спекаемый, горячепрессованный, HPSN	Si_3N_4 > 95 %	3,2	600 . . 900	> 3000	310	3,2 . . 3,5	30 ... 40	0,7	10^{12}	–	–
Нитрид кремния спекаемый, горячепрессованный, RBSN	Si_3N_4 > 99 %	2,4 . . 2,6	200 . . 300	–	140 ... 160	2,9 . . 3,0	15 ... 20	0,7	10^{14}	–	–

Материал	Химический состав	ϱ[1], г/см³	σ_{bB}[2], МН/м²	σ_{dB}[3], МН/м²	E[4], ГН/м²	α_l[5], 10^{-6}/К	λ[6], Вт/м · м	c[7], кДж/кг	ϱ_D[8], Ом · см	ε_r[9]	tg δ[10] 10^{-4}
Нитрид кремния спекаемый, горячепрессованный, SSN	Si_3N_4 > 90 %	3,2	400 .. 700	> 2500	300	3,2 . . 3,5	30 ... 40	0,7	10^{12}	–	–
Нитрид титана	TiN	5,4	–	–	260	9,4	40	–	$3\ 10^{-5}$	–	–
Оксид алюминия	Al_2O_3 > 99 %	3,9 . . 4,0	300 .. 500	3000 ... 4000	380 ... 400	7,2 ... 8,6	20 ... 40	0,8 ... 0,9	> 10^{11}	8 ... 10	2
Оксид бериллия	BeO > 99 %	2,9 . . 3,0	250 .. 320	1500	300 ... 340	8,5 ... 9,0	240 ... 280	1,0	> 10^{14}	6,5	3 ... 5
Стеатит (мыльный камень) KER 220, 221	SiO_2 55...65 % MgO 25 ... 35 % Al_2O_3 2 ... 6 % Алк. оксид < 1,5 %	2,6 . . 2,9	120 .. 140	850 ... 1000	80 ... 100	7,0 . . 9,0	2,3 ... 2,8	0,7 ... 0,9	> 10^{11}	6	10...20
Титанат алюминия	$Al_2O_3 \cdot TiO_2$	3,0 . . 3,2	20 .. 40	450 ... 550	10 ... 20	0,5 . . 1,5	< 2	0,7	> 10^{11}	–	–
Фарфор, например, KER 110–2	Al_2O_3 30 ... 35 % баланс SiO_2 + стеклообразная фаза	2,2 . . 2,4	45 .. 60	500 ... 550	50	4,0 ... 6,5	1,2 ... 2,6	0,8	10^{11}	6	120
Стандарты для испытаний		DIN EN 623, часть 2	DIN EN 843, часть 1	DIN EN 993, часть 5	DIN EN 843, часть 2	DIN EN 821, часть 1	DIN EN 821, часть 2	DIN EN 821, часть 3	DIN VDE 6067, части 2 и 3		

Характеристики каждого материала изменяются в широких пределах в зависимости от исходного сырья и технологии изготовления. Приведенные в таблице данные представлены различными компаниями-изготовителями. Обозначение «KER» соответствует стандарту DIN EN 60672-1.

1) Плотность.
2) Предел прочности на трехосный изгиб.
3) Предел прочности на сжатие.
4) Модуль упругости
5) Коэффициент теплового расширения в диапазоне до 1000°C.
6) Теплопроводность при температуре 20°C.
7) Удельное теплообразование.
8) Удельное электросопротивление при температуре 20°C и частоте 50 Гц.
9) Относительная диэлектрическая проницаемость.
10) Потеря диэлектрических свойств при температуре 25°C и частоте 10 МГц.

Слоистые материалы

Тип материала	Тип смолы	Наполнитель	ϑ_c [1] °C	σ_{bB} [2] min Н/мм²	$a_{cu\,10}$ [3] min кДж/м²	CTI [4] min., класс	Свойства и область применения
Слоистые материалы на бумажной основе DIN EN ISO 60-893-3-1							
PF CP 201 (Hp 2061) [5]	Феноловая смола	Бумажная прокладка	120	135	–	CTI 100	Для механически нагруженных деталей
PF CP 204 (Hp 2063) [5]	Феноловая смола	Бумажная прокладка	105	75	–	CTI 100	Для электрически нагруженных деталей; основной материал FR2 для печатных плат
EP CP 201 (Hp 2361.1) [5]	Эпоксидная смола	Бумажная прокладка	110	110	–	CTI 100	Хорошие механическая прочность и электрические свойства, обладает сопротивлением прохождению тока; основной материал FR3 для печатных плат
Слоистые материалы на тканевой основе DIN EN ISO 60-893-3-1							
PF GC 201 (Hgw 2072) [5]	Феноловая смола	Стекловолокнистая ткань	120	140	25	CTI 100	Высокая механическая, термо- и электростойкость
PF CC 201 (Hgw 2082) [5]	Феноловая смола	Тонковолокнистая хлопковая ткань	120	100	18.8	CTI 100	Хорошая обрабатываемость, хорошее скольжение и износостойкость
PF CC 203 (Hgw 2083) [5]	Феноловая смола	Стекловолокнистая хлопковая ткань	120	110	17	CTI 100	особенно для шестерен, подшипников
EP GC 201 (Hgw 2372) [5]	Эпоксидная смола	Стекловолокнистая ткань	130	340	33	CTI 200	Оптимальные механические и электрические свойства
EP GC 202 (Hgw 2372 1) [5]	Эпоксидная смола	Стекловолокнистая ткань	155	340	33	CTI 200	Оптимальные механические и электрические свойства; основной материал FR4 для печатных плат
EP GC 203 (Hgw 2372 4) [5]	Эпоксидная смола	Стекловолокнистая ткань	155	340	33	CTI 180	Для термически высоконагруженных деталей
SI GC 201 (Hgw 2572) [5]	Силиконовая смола	Стекловолокнистая ткань	180	190	20	PTI 450	для высокотемпературных условий работы
Слоистые материалы на стеклянной основе DIN EN 60-893-3-1							
UP GM 201 (Hm 2472) [5]	Нерастворимая полиэфирная смола	Стекловолокнистая ткань	130	130	40	CTI 500	Хорошие механические и электрические свойства, особенно по сопротивлению прохождения тока

[1] Предельно допустимая температура в соответствии со стандартом VDE 0304, часть 2, для срока службы 25000 часов.
[2] Предел прочности на изгиб в соответствии со стандартом DIN 53 452.
[3] Предел ударной вязкости в соответствии со стандартом ISO 179 (тестовые испытания по IEC 60 893-2).
[4] Дугоустойчивость DIN IEC 112, предел ударной вязкости (CTI).
[5] В круглых скобках старое обозначение

Наименование	Код материала (ISO 1043/ DIN 7728)	t_G[1], °C	E[2], Н/мм²	a_{k10}[3], мин., кДж/м²	Электросопротивление [4] при температуре 20°C в среде					Другие свойства и область применения
					бензина	бензола	дизельного топлива	спирта	минерального масла	
Термопластмассы (DIN 7740...7749; DIN 16 771...16 781)										
Акрилнитрил-бутадиен-стирен	ABS	80	2000	5 .. 15	0	–	×	+	+	Имеет глянцевую поверхность, прочный корпус, некоторые типы прозрачны
Фторированный гидрокарбонат	FEP PFA	250/205 260	600 650	[6] [6]	+ +	+ +	+ +	+ +	+ +	Резко снижается жесткость при повышении температуры; устойчивость к воздействию химикатов; применяется для покрытий, уплотнений, трущихся деталей
Полиамид 11, 12	PA 11, 12	140/120	1500	20 .. 40	+	+	+	0	+	Обладает жесткостью при водопоглощении 1...3%, твердостью, износостойкостью, малым коэффициентом трения, поглощает шум
Полиамид 6	PA 6	170/120	2500	40 .. 90	+	+	+	×	+	
Полиамид 66	PA 66	190/120	2800	10 .. 20	+	+	+	×	+	
Полиамид 6 + GF[5]	PA 6-GF	190/120	5000	8 .. 14	+	+	+	×	+	Имеет хорошую ударную прочность
Полиамид 66 + GF[5]	PA66-GF	200/120	6000	6 .. 12	+	+	+	×	+	
Полиамид 6T/6I/66 + GF45	PA 6T/6I/66 + GF45	285/185	14 000	8 .. 12	+	+	+	×	+	Сохраняет твердость при повышении температуры; используется для корпусных деталеи
Полиамид MXD6 + GF50	PA MXD6 + GF50	240/170	15 000	8 .. 12	+	+	+	×	+	
Полиамид 6/6T + GF[5]	PA6/6 T-GF	250/170	10 000	6 .. 12	+	+	+	×	+	
Полибутилен	PBT	160/120	1700	2 .. 4	+	+	+	+	+	Обладает износостойкостью, сопротивлением воздействию химикатов, при температуре свыше 60°C жесткость уменьшается
Полибутилен	PBT-GF	180/120	5000	5 .. 9	+	+	+	+	+	Имеет большую жесткость
Поликарбонат	PC	130/125	2500	20 .. 30	+	–	+	0	+	Обладает однородной жесткостью и прочностью в широком диапазоне температур, прозрачен
Поликарбонат + GF[5]	PC-GF	130	4500	6 .. 15	+	–	+	0	+	Применяется для жестких и твердых конструкционных деталей

Полиэтилен	PE	80	1000	[6]	×	0	+	+	+	Устойчив к воздействию кислот, применяется для контейнеров, трубопроводов
Полиэтилентерефталат	PET	180/120	2000	2 .. 7	+	+	+	+	+	Износостоек, выдерживает воздействие химикатов, при температуре свыше 60 °C жесткость снижается
Сополимер циклоолефинов	COC	160	3000	1,7 ... 2	–	–	–	+	–	Прозрачен, водостоек
Жидкокристаллический полимер + GF[5]	LCP-GF	300/240	15 000	8 .. 16	+	+	+	+	+	Высокое сопротивление термическому деформированию, высокая ударная вязкость, низкая прочность связей, применяется в качестве тонкостенного компонента
Полиэфирсульфон + GF[5]	PES-GF	220/180	9000	6 .. 10	+	0	+	+	+	Устойчив к нагреву
Эфиркетон полиэфира+GF[5]	PEEK	320/250	9000	6,5 ... 10	+	+	+	+	+	Низкий коэффициент трения скольжения, низкий износ, применяется при высоких температурах для высоконагруженных деталей
Полиэтилентерефталат + GF[5]	PET-GF	200/120	7000	5 .. 12	+	+	+	+	+	Высокая жесткость
Полиметилметакрилат	PMMA	80	3000	1,5 ... 2,5	+	–	×	0	+	Водостоек, хорошо рассеивает свет; применяется в качестве линз
Полиоксиметилен Полиоксиметилен + GF[5]	POM POM-GF	125/120 140/120	2000 6000	5 .. 7 3 .. 5	+ +	0 0	+ +	+ +	+ +	Подвержен трещинообразованию под воздействием кислот
Полифенилен-эфир + SB[7]	(PPE S/B)	120/100	2500	4 .. 14	0	–	0	0	+	Устойчив к воздействию горячей воды, замедляет горение
Сульфид полифенилена + GF[5]	PPS-GF	270/240	13 000	4 .. 7	+	+	+	+	+	Устойчив к нагреву
Полипропилен	PP	130/110	1500	6 .. 10	×	0	+	×	+	Применяется для корпусных деталей, батарейных ящиков, кожухов
Полипропилен + GF[5]	PP-GF	130/110	4000	4 .. 8	×	0	+	×	+	Применяется для шкивов вентилятора
Полистирен	PS	80	2500	2 .. 3	–	–	0	0	×	Прозрачен, применяется для цветных покрытий, литых деталей
Поливинилхлорид пластифицированный	PVC-P	80/70	200	[6]	–	–	0	0	+	Применяется для изготовления искусственной кожи, мягких покрытий, изоляции кабелей и труб, уплотнений
Поливинилхлорид непластифицированный	PVC-U	70/60	3000	2 .. 30	+	–	+	+	+	Водостоек, применяется для наружных деталей, трубопроводов

Наименование	Код материала (ISO 1043/ DIN 7728)	t_G[1], °C	$E^{[2]}$, Н/мм²	a_{k10}[3], мин., кДж/м²	Электросопротивление[4] при температуре 20 °C в среде					Другие свойства и область применения
					бензина	бензола	дизельного топлива	спирта	минерального масла	
Полиуретан твердый	PUR	150/130	900	2,5	+	+	+	0	+	Применяется для трущихся деталей
Полиуретан мягкий	PUR	120/100	40	[6]	+	0	+	0	+	Применяется для изоляторов, диафрагм
Стирен–акрилонитрил	SAN	90	3000	1,5 ... 2,5	0	–	×	0	+	Имеет хорошую химическую стойкость, прозрачен, применяется для литых деталей
Стирен–бутадиен	S/B	60	1500	4 14	–	–	–	×	+	Применяется для различных прочных корпусных деталей
Изготавливаемые литьем и спеканием пластмассы без поперечных связей:										
Полиимид	PI	320/290	3100	2	+	+	+	+	+	Имеет высокую термостойкость, устойчив к облучению
Политетрафторэтилен	PTFE	300/240	400	13 ... 15	+	+	+	+	+	С повышением температуры резко снижается жесткость; обладает термостойкостью, устойчив к воздействию химикатов, к старению, обладает низким коэффициентом трения, применяется в парах трения

[1] Диапазон наибольших рабочих температур для краткосрочного (1 ч) и долгосрочного (5 тыс. ч) применения.
[2] Модуль упругости, нормируемая величина;
[3] Предел ударной вязкости в соответствии со стандартом DIN 53 453.
[4] (+) – хорошее сопротивление, (x) – ограниченное сопротивление, (0) – низкое сопротивление, (–) – отсутствует сопротивление.
[5] GF (фибергласс) составляет 25–35% от веса стекловолокна.
[6] Без разрушения.
[7] композиционный синтетический материал.

Тип материала	Тип смолы	Наполнитель	t_G[1] °C	σ_{bB}[2] min. Н/мм²	a_n[3] min кДж/м²	CTI[4] min. класс	Свойства, область применения
Термореактивные пластмассы (новые стандарты): – Прессованная масса сыпучего фенола (PF–PMC) DIN EN ISO 14526 – Прессованная масса из сыпучего меламина / формальдегида (MF–PMC) DIN EN ISO 14528 – Прессованная масса из меламина / фенольного (MP–PMC) DIN EN ISO 14529 – Прессованная масса из сыпучих ненасыщенных полиэфиров (UP–PMC) DIN EN ISO 14530 – Прессованная масса из сыпучей эпоксидной смолы (EP–PMC) DIN EN ISO 15252							
(WD30+MD20) до (WD40+MD10) (31 и 31,5)[7]	Фенол[8]	Измельченная древесина	160/140	70	6	CTI 125	Для деталей, подверженным высоким электрическим нагрузкам[9]
(LF20+MD25) до (LF30+MD15) (51)[7]		Целлюлоза[5]	160/140	60	5	CTI 150	Для деталей с хорошей электроизоляцией при низких напряжениях. Тип 74 имеет высокую ударную прочность[9]
*SS40 в SS50 (74)[7]		Хлопковая ткань[5]	160/140	60	12	CTI 150	
(LF20+MD25) до (LF40+MD05) (83)[7]		Волокна хлопка[6]	160/140	60	5	CTI 150	Более высокая прочность по сравнению с типом 31[9]
–		Стекловолокно с короткими волокнами	220/180	200	12	CTI 125	Высокая механическая прочность. Очень хорошая устойчивость к воздействию автомобильных жидкостей, низкое разбухание
–		Стекловолокно с длинными волокнами	220/180	230	17	CTI 175	
–		Углеродное волокно	220/180	250	14	–	Высокая жесткость, низкая плотность, хорошие характеристики износа. Не подходит для примения в электрообрудовании (является проводящим материалом)
(WD30+MD15) до (WD40+MD05) (150)[7]	Меламин	Измельченная древесина	160/140	70	6	CTI 600	Сопротивление к тепловому излучению, превосходные электрические свойства, высокая стойкость к сжатию

[1] Диапазон наибольших рабочих температур для краткосрочного (100 ч)/ долгосрочного (20000 ч) применения.
[2] Предел прочности на изгиб.
[3] Предел ударной прочности.
[4] Сопротивление прохождению тока в соотвествии с DIN IEC 112, сравнительный индекс прохождения (CTI)
[5] С добавлением или без добавления других органических наполнителей.
[6] С добавлением или без добавления древесной муки
[7] В скобках – старое обозначение.
[8] Не используются типы от 13 до 83 (наполнение массы частей органикой) и для нового применения (наличие не гарантировано).
[9] Используется лишь в новых приложениях. Поставка не гарантируется на длительный срок

Тип материала	Тип смолы	Наполнитель	ϑ_{ch} [1] °C	σ_{bB} [2] min. Н/мм²	a_n [3] min кДж/м²	CTI [4] min. класс	Свойства, область применения
Термореактивные пластмассы							
LD35 до LD45 (181) [7]	Меламин-фенол	Целлюлоза	160/140	80	7	CTI 250	Для деталей, подверженных электрическим и механическим нагрузкам
(GF10 + MD60) до (GF20 + MD50) (802 and 804) [7]	Полиэфир	Стекловолокно, неорганический наполнитель	220/170	55	4,5	CTI 600	Типы 801, 804: низкие требования к давлению прессования (возможно использование частей большей площади); тип 803, 804: светотеплостойкость
MD65 до MD75	Эпоксидная смола	Горная мука	200/170	80	5	CTI 600	Очень хорошие электрические свойства. Покрытие для датчиков и исполнительных механизмов
(GF25 + MD45) до (GF35 + MD35)		Стекловолокно/ минерал	230/190	160	10	CTI 250	
	Масса из эпоксидной смолы, прессованная под низким давлением	SiO_2 (сферический)	250/200	120	6		Герметизация чипа (тонко-соединенные провода)

[1] Диапазон наибольших рабочих температур, для краткосрочного (100 ч)/долгосрочного (20 000 ч) применения.
[2] Предел прочности на изгиб.
[3] Предел ударной прочности.
[4] Сопротивление прохождению тока в соответствии с DIN IEC 112, сравнительный индекс прохождения (CTI).
[5] С добавлением или без добавления других органических наполнителей.
[6] С добавлением или без добавления древесной муки.
[7] В скобках – старые обозначения.
[8] Не используются типы от 13 до 83 (наполнение массы чистой органикой) для новых областей применения (наличие не гарантировано)

Наименование материала	Обозначение [7]	Температурный диапазон применения [8], °C	Твердость по Шору	Предел прочности на растяжение [9], Н/мм²	Предельное удлинение [9], %	Электросопротивление [11]					Возгораемость в жидких средах [12]			
						при атмосферных условиях	в озоне	в бензине	в дизельном топливе	в минеральном масле	A	B	C	D
Эластомеры														
Полиакриловая резина	ACM	– 20 ... + 150	55 ... 90	5 ... 13	100 ... 350	×	+	–	×	+	+	×	×	–
Нитрилбутадиеновая резина	NBR	– 30 ... + 120	35 ... 100	10 ... 25	100 ... 700	× [10]	– [10]	×	×	+	×	×	+	–
Бутиловая резина	IIR	– 40 ... + 125	40 ... 85	7 ... 17	300 ... 600	× [10]	× [10]	–	–	–	–	–	+	×
Хлоропреновая резина	CR	– 40 ... + 110	20 ... 90	7 ... 25	100 ... 800	×	× [10]	×	×	×	0	0	+	–
Хлорированный полиэтилен	CM	– 30 ... + 140	50 ... 95	10 ... 20	100 ... 700	+	+	0	0	×	×	×	+	–
Хлоросульфонатный полиэтилен	CSM	– 30 ... + 140	50 ... 85	15 ... 25	200 ... 500	+	+	–	0	0	×	×	+	–
Эпихлорогидриновая резина	ECO	– 40 ... + 135	50 ... 90	6 ... 15	150 ... 500	+	+	×	×	+	×	×	–	–
Этиленакрилатная резина	EAM	– 40 ... + 185	50 ... 75	7 ... 14	200 ... 500	+	+	0	0	0	+	×	×	–
Этиленпропиленовая резина	EPDM	– 50 ... + 150	20 ... 85	7 ... 17	150 ... 500	+	+	–	–	–	–	–	+	+
Фтористоуглеродная резина	FPM	– 25 ... + 250	40 ... 90	7 ... 17	100 ... 350	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Фторосиликоновая резина	FMQ	– 60 ... + 200	40 ... 70	4 ... 9	100 ... 400	+	+	×	+	+	+	+	–	+
Гидрогенная нитриловая резина	HNBR	– 20 ... + 150	45 ... 90	15 ... 35	100 ... 600	+	+	×	+	+	+	+	+	–
Природный каучук	NR	– 55 ... + 90	20 ... 100	15 ... 30	100 ... 800	0 [10]	– [10]	–	–	–	–	–	+	–
Полиуретановые эластомеры	AU EU	– 25 ... + 80	50 ... 98	20 ... 50	300 ... 700	×	×	–	–	0	–	–	–	–
Силиконовая резина	VMQ	– 60 ... + 200	20 ... 80	4 ... 9	100 ... 400	+	+	–	0	×	+	+	+	+
Стиренбутадиеновая резина	SBR	– 50 ... + 110	30 ... 100	7 ... 30	100 ... 800	0 [10]	– [10]	–	–	–	–	–	+	–

Наименование материала	Обозначение [7]	Температурный диапазон применения [8], °C	Твердость по Шору	Предел прочности на растяжение [9], Н/мм²	Предельное удлинение [9], %	Электросопротивление [11]				
						при атмосферных условиях	в озоне	в бензине	в дизельном топливе	в минеральном масле
Термопластические эластомеры										
Смесь олефинов при отсутствии полных поперечных связей	TPE–O[14]	–40 .. +100 (120)	45 . . 50	3 .. 15	250 . . 600	+	+	0	0	0
Смесь стиреновых блокполимеров	TPE–S[14]	–60 .. +60 (100)	30 . . 90	3 .. 12	500 . . 900	+	+	–	–	–
Полиэфирный эластомер	TPE–E[14]	– 50 ... + 150	40 .. 80	9 ... 47	240 . . 800	0[10]	×	×	+	+
Полиэфируретан	TPE–U[14]	– 40 ... + 100	70	15 .. 55	250 . . 600	0[10]	+	0	×	+
Полиэфирблокамид	TPE–A[14]	– 40 ... + 80	70 ... 75	30 ... 60	300 .. 500	0[10]	+	×	+	×

[7] Стандарт DIN ISO 1629.

[8] Для непродолжительного использования.

[9] В зависимости от состава пластмассы.

[10] Может быть повышено за счет добавления защитных веществ.

[11] (+) – хорошее сопротивление, (x) – ограниченное сопротивление, (0) – низкое сопротивление, (–) – отсутствует сопротивление.

[12] A – масло в воде, B – вода в масле, C – раствор полигликоля в воде, D – синтетические жидкости.

[14] Устаревший стандарт ISO.

Кодовое обозначение, химическое название и торговая марка пластмасс[3)]

Кодовое обозначение (латин.)	Химическое название	Торговая марка
ABS	Акрилонитрил–бутадиен–стирен	Циколак, новодур, ронфалин, терлуран
ACM	Полиакрилатная резина	Цианакрил, гикар
EAM [1)]	Этилен–акрилатная резина	Вамак
APE [1)]	Этилен–пропиленовая резина	Арилеф, APEC
ASA	Акрилат–стирен–акрилонитрил	Луран S
AU	Полиуретановые эластомеры	Урепан
CA	Целлюлоза ацетатная	Ергасел, тенит
CAB	Целлюлоза ацетат–бутиратовая	Целидор, тенит
CM	Хлорированный полиэтилен	Байер CM, CPE
CR	Хлоропреновая резина	Байпрен, неопрен
CSM	Хлоросульфонатный полиэтилен	Гипалон
ECO	Эпихлоргидриновая резина	Герклор, гидрин
EP	Эпоксидная смола	Аралдит
EPDM	Этиленпропиленовая резина	Буна AP, дутрал, келтан, нордел, висталон
EU	Полиуретановые эластомеры	Адипрен С
FPM	Фтористоуглеродная резина	DAI–EL, флуорел, технофлон, витон
HNBR [1)]	Гидрогенная нитриловая резина	Тербан, зетпол
IR	Изопреновая резина	Карифлекс IR, натсин
MF	Меламин–формальдегид	Бакелит, резинол, супрапласт, резопал
MPF	Меламин/фенол–формальдегид	Супрапласт, резипласт
MVQ	Силиконовая резина	Родорсил, силастик, силопрен
NBR	Нитрилбутадиеновая резина	Буна N, чемигум, гикар, пербунан
PA 46 [1)]	Полиамид 46	Станил
PA 6–3–T	Аморфный полиамид	Трогамид Т
PA 6	Полиамид 6 (полимеры ε–капролактама)	Акулон, дуретан В, грилон, нивионпласт, перлон, ренил, сниамид, текнил, ультрамид В, велламид
PA 66	Полиамид 66 (полимеры гексаметилендиамида и жирной кислоты)	Акулон, дуретан А, минлон, нивионпласт, нейлон, сниамид, текнил, ультрамид А, велламид, зитель
PA X[1)]	X = частично ароматические полиамиды	Ультрамид Т[4)], амодел 1...[5)], амодел 4...[5)], гривори GV[7)], гривори HTV[8)], зитель HTN[9)], IXEF[10)]
PA 11	Полиамид 11 (полимеры 11–аминоундеканоиковой кислоты)	Рилсан В
PA 12	Полиамид 12 (полимеры додекалактама)	Гриламид, рилсан А, вестамид
PAI	Имид полиамида	Торлон
PAN	Полиакрилонитрил	Дралон, орлон
PBTP	Полибутилен–терефталат	Крастин, покан, ультрадур, вестодур, пибитер
PC	Поликарбонат	Макролон, оргалан, синвет, лексан
PA 612	Полиамид 612 (полимеры гексаметилена диаминовой и додеканоиковой кислот)	Зитель
COC[1)]	Циклоолефиновые сополимеры	Топас
LCP	Жидкокристаллические полимеры	Вектра, зенит
PA 6/66	Сополиамид 6/66	Ультрамид С, технил, грилон TSV
SPS[1)]	Синдиотактический полистирол	Куестра, ксарек
PK[1)]	Поликетон	Карилон
LFT[1)]	Термопластик, усиленный длинными волокнами	Целстран

Сноски см. с 179

Кодовое обозначение	Химическое название	Торговая марка
(PC + ABS)	Смесь поликарбоната с ABS	Бейбленд Т, циколой
(PC + ASA)	Смесь поликарбоната с ASA	Терблend S
(PC–PBT)	Смесь поликарбоната с PBT	Макробленд РК, ксеной
PE	Полиэтилен	Гостален, луполен; стамилан, вестолен
PEBA [1]	Полиэфир–блокамид	Пебакс
PEEK [1]	Эфирный кетон полиэфира	Виктрекс «PEEK»
PEI	Имид полиэфира	Ультем
PES	Сульфонат полиэфира	Виктрекс «PES»
PETFE [1]	Сополимер этилен–тетрафторэтилена	Гостафлон ЕТ, тефзел
PETP	Терефталат полиэтилена	Арнит, крастин, милар, ринит, тревира
PF	Фенол–формальдегид	Бакелит, супрапласт, винколит
PFA	Перфтороалкоксиэтилен	Тефлон PFA
PFEP [1]	Фторированный сополимер этилен–пропилена	Тефлон FEP
PI	Полиимид	Каптон, керимид, кинель, веспель
PMMA	Полиметилметакрилат	Дегалан, диакон, лукрил, перспекс, плексиглас, ведрил
POM	Полиоксиметилен, полиформальдегид (полиацетал)	Делрин, гостаформ С, ультраформ
PP	Полипропилен	Даплен, гостален РР, моплен, стамилан Р, старпилен, вестолен
PPA	Ароматический полифталамид	Амодел
(PPE + SB)	Смесь полифениленового эфира с SB	Норил, луранил
(PPE + PA)	Смесь полифениленового эфира с PA	Норил GTX, ультранил, вестобленд
PPS	Сульфид полифенилена	Ритон
PS	Полистирен	Эдистир, гостирен, лустрекс
PSU	Полисульфонат	Удел, ультрасон S
PTFE	Политетрафторэтилен	Флюон, гостафлон, тефлон
PUR	Полиуретан	Десмопан, эластолан, лайкра, вуколан
PVC–P	Пластифицированный поливинилхлорид	Трозипласт, вестолит, винофлекс
PVC–U	Непластифицированный поливинилхлорид	Тровидур, госталит, винидур, вестолид
PVDF	Фторид поливинилидена	Дифлор, кинар, солеф
PVF	Фторид поливинила	Тедлар
SAN	Стирен–акрилнитрил	Костил, луран, тирил
SB	Стирен–бутадиен	Хостирен, лустрекс
SBR	Стирен–бутадиеновая резина	Буна хюлс, буна S, карифлекс S
TPE–A[1]	Полиэфирблокамид	Пебакс, вестамид Е
TPE–E [1]	TPE [2] на базе полиэфира	Арнител, гитрел, ритефлекс
TPE–O [1]	TPE [2] на базе олефина	Лерафлекс, сантопрен
TPE–S [1]	TPE [2] на базе стирена	Карифлекс, эвопрен, кратон
TPE–11[1]	Полиэфируретан	Десмопан, эластоллан
UF	Карбамид (мочевина)–формальдегид	Бакелит, полопас
UP	Ненасыщенный полиэфир	Керипол, легувал, палатал

[1] Код материала не стандартизован; [2] TPE–термопластичные пластмассы; [3] стандарт ISO 1043/DIN 7728 (термопластичные, термореактивные пластмассы), ISO 1629 (резина), [4] PA 6/6T; [5] PA 6T/6I/66; [6] PA 6T/ 66, [7] PA 66 + PA 6I/6T, [8] PA 6I/6T, [9] PA 6T/MPMDT, [10] PA MXD 6.
Коды материалов, приведенные в ссылках [4] – [10], стандартизованы.

Слой	Толщина слоя, мкм	Структурные элементы	Состав					Применение
			Связующее вещество	Растворители	Красители	Наполнители	Добавки и SC	
1a	20...25	KTL	Эпоксидные смолы, полиуретан	Вода, малые количества органических растворителей	Неорганические и органические	Неорганические	Поверхностно-активные вещества, 20% SC	ET
1b	30...35	DS-KTL						
2a	≈ 35	Грунтовка поверхностей	Полиэфир-меламин, карбамид и эпоксидная смола	Спирты, ароматические растворы	Неорганические и органические	Неорганические	Поверхностно-активные вещества, противопузырьковые добавки (без силиконов), 58 ... 62% SC	PZ ESTA-HR
2b	≈ 35	Первичный водостойкий слой	Растворенные в воде полиэфир и меламиновая смола	Вода, малые количества органических растворителей				ESTA-HR
2c	≈ 20	Тонкопленочный водный наполнитель	Водный раствор полиуретана и меламиновых смол	Вода, малые количества водорастворимых органических растворителей		Неорганический растворитель	Поверхностно-активные вещества, противопузырьковые добавки, 32...45% SC	PZ ESTA-HR
3a	40...50	Поверхностное защитное покрытие	Алкидная и меламиновая смолы	Эфир, спирты, ароматические растворы		–	Выравнивающие поверхность вещества и противопузырьковые добавки	PZ ESTA-HR
3b	9...30 (в зависимости от цвета)	Сплошное водостойкое покрытие	Растворенные в воде полиэфир, полиуретан и меламиновая смола	–		–	Свободные от кремния противопузырьковые добавки, 20 ... 40% SC	PZ ESTA-HR
4a	40...50	Глянцующий слой	Акриловая и меламиновая смолы	Ароматические растворы, спирты, эфиры	–	–	Выравнивающие поверхность вещества и легкие стабилизаторы, 45% SC	PZ ESTA-HR
4b	40...50	2K-HS	Полиизоцианаты акриловой смолы	Эфиры, ароматические растворы	–	–	Выравнивающие поверхность вещества и легкие стабилизаторы, 58% SC	
4c	40...50	Прозрачный слой порошковой суспензии	Эпоксидно-карбоксидная система, модифицированная уретаном	–	–	–	Например, легкие стабилизаторы, 38% SC	

Покрытия: DS – пленочное; ESTA-HR – электростатическое; ET – электрофорезное; SC (FK) – твердые нелетучие частицы; KTL – катодное; PZ – вакуумное; 2K-HS – 2-компонентное высокопрочное (нелетучее).

Слой	Толщина слоя, мкм	Структурные элементы	Состав					
			Связующее вещество	Растворители	Красители	Наполнители	Добавки и SC	Применение
1a	20...25	KTL	Эпоксидная смола, полиуретан	Вода, малые количества органических растворителей	Неорганические и органические	Неорганические	Поверхностно-активные вещества, 20% SC	ET
1b	30...35	DS-KTL						
2a	≈ 35	Грунтовка поверхностей, меламиновая и эпоксидная смолы, карбамид (мочевина)	Полиэфиры, спирты	Спирты, ароматические растворы	Неорганические и органические	Неорганические	Поверхностно-активные вещества, противопузырьковые добавки (без силиконов), 58 . . 62% SC	PZ ESTA-HR
2b	≈ 35	Первичный водостойкий слой	Растворимые в воде полиэфир и меламиновая смола	Вода, малые количества органических растворителей				ESTA-HR
2c	≈ 20	Тонкопленочный водный наполнитель		Вода, малые количества водо-растворимых органических растворителей			Например, увлажняющие агенты, поверхностно-активные вещества, 32...45% SC	PZ ESTA-HR
3a	10...15	Металлизированное покрытие	Полиэфир и меламиновая смола	Эфиры, ароматические соединения	Алюминиевые частицы	–	15...30% SC	PZ ESTA-HR
3b	10...15	Растворимое в воде покрытие на металлизированной основе	Растворимые в воде полиэфир, полиуретан и меламиновая смола	–	Частицы слюды и алюминия, органические и неорганические красители	–	Свободные от кремния противопузырьковые добавки	PZ ESTA-HR
4a	40...50	Глянцующий слой	Акриловая и меламиновая смолы	Ароматические соединения, спирты, эфиры	–	–	Выравнивающие поверхность вещества и легкие стабилизаторы, 45% SC	PZ ESTA-HR
4b	40...50	2K-HS	Полиизоцианаты акриловой смолы	Эфиры, ароматические соединения	–	–	Выравнивающие поверхность вещества и легкие стабилизаторы, 58% SC	
4c	40...50	Прозрачный слой порошковой суспензии	эпоксидно-карбоксидная система, модифицированная уретаном	–	–	–	Например, легкие стабилизаторы, 38% SC	

Покрытия: DS – пленочное; ESTA-HR – электростатическое; ET – электрофорезное; SC (FK) – твердые нелетучие частицы; KTL – катодное; PZ – вакуумное; 2K-HS –2-компонентное высокопрочное (нелетучее).

Термическая обработка металлов

Твердость

Твердость – свойство твердых материалов, определяющее их сопротивляемость проникновению более твердого тела. В металлических материалах твердость используется для оценки механических свойств, таких как прочность, обрабатываемость, пластичность и устойчивость к износу. Стандарт DIN EN ISO 18265 [1] определяет нормативы для определения по твердости предела прочности на растяжение или разрыв.

Испытания на твердость

Испытание на твердость является неразрушающим способом получения информации о механических свойств материала в относительно короткий период времени.

Данные испытаний получают на основе оценки размеров производимых деформаций, когда к определенному виду испытательного оборудования или инструмента прикладывается конкретное усилие. Необходимо различать статические и динамические испытания. Статическое испытание основано на постоянном отпечатке, оставляемом испытательным инструментом. Стандартные методы испытаний твердости включают измерения по Роквеллу, Виккерсу и Бринеллю. На рис . 1 приведено сравнение области применения проверки твердости на основе этих процедур.

При динамическом испытании контролируется величина отскока испытательного инструмента от поверхности испытываемого образца.

Другим методом получения показателя поверхностной твердости является нанесение царапин с помощью испытательного инструмента с последующим измерением ширины образовавшейся бороздки.

Методы испытаний на твердость

Твердость по Роквеллу
(DIN EN ISO 6508, [2])

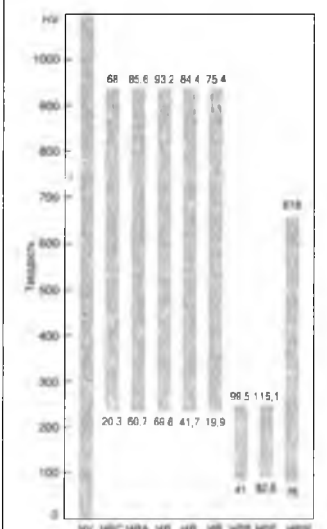
Этот метод наиболее подходит для быстрого автоматизированного тестирования металлических деталей, но в местах, определенных требованиями фиксирования образца на испытательном оборудовании. Он не подходит для деталей, которые, из-за особенностей их геометрии, не могут быть установлены на испытательном оборудовании (например, трубы).

Этот метод предполагает использование испытательного инструмента (индентора) заданного размера и формы (конической или сферической), изготовленного из определенного материала (стали, твердого сплава или алмаза), который давит в два этапа на поверхность испытуемого образца. В этом процессе, после предварительного действия испытательной силы, прикладывается дополнительная испытательная сила в течение определенного периода времени.

Затем дополнительная испытательная сила снимается, и, при сохранении предварительной испытательной силы, рассчитывается твердость по Роквеллу HR, исходя из глубины проникновения h и двух постоянных

Рис. 1. Диапазоны измерений твердости при различных методах испытаний для нелегированных и низколегированных сталей и стальных отливок
Численные значения крайних точек диапазонов означают данные твердости для соответствующего метода.
HV – твердость по Виккерсу;
HR – твердость по Роквеллу,
HBW – твердость по Бринеллю

UHM0006 1E



численные значений N и S, в соответствии с формулой:

$$HR = \frac{N\,h}{S}.$$

Численное значение N и деление шкалы S зависят от типа индентора и испытательной нагрузки.

Испытательная поверхность должна быть гладкой и как можно более плоской. Если радиус кривизны образца составляет менее 20 мм, то результаты должны подбираться с использованием поправочного коэффициента. При испытании выпуклых цилиндрических или сферических поверхностей определяемое значение должны быть скорректировано в зависимости от твердости.

Сокращение выбранного метода испытания добавляется к численному значению полученной твердости (например: 65 HRC, 76 HR45N). Обозначения указывают на используемый индентор (алмазный конус или шар), на предварительную и общую испытательные силы. В зависимости от используемого индентора и общей испытательной силы существуют различные шкалы твердости с сокращениями HRA, HRB, HRC, HRD, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK, HR15N, HR30N, HR45N, HR15T, HR30T и HR45T.

К преимуществам испытания по методу Роквелла относятся минимальная подготовка образца и быстрота измерения. Этот процесс испытания может быть полностью автоматизирован. Любые вибрации или перемещения испытуемого образца или индентора могут привести к ошибкам испытания, а неровная установка образца может вызвать повреждение индентора.

Твердость по Бринеллю (DIN EN ISO 6506, [3])
Этот метод используется для металлов, имеющих твердость от низкой до средней. В качестве инструмента (индентора) применяется закаленный стальной шарик диаметром D. Он прикладывается к поверхности образца с вертикальным усилием F. Основой для вычисления твердости по Бринеллю служит определение с помощью микроскопа результирующей величины деформации диаметром d:

$$HBW = 0{,}102\,\frac{2F}{\pi D^2\left(1-\sqrt{1-d^2/D^2}\right)},$$

где F – сила, Н;
D – диаметр шарика, мм;
d – диаметр отпечатка, мм.

Диапазон испытательных усилий составляет от 9,81 до 29 420 Н. Результаты, получаемые при использовании шариков различных диаметров, являются условно сравнимыми при идентичных уровнях прилагаемых усилий. Испытание всегда должно выполняться путем использования наибольшего из возможных шариков или выбором соответствующей нагрузки с целью получения диаметров отпечатков от 0,24 D до 0,6 D. В табл. 1 приведены рекомендуемые коэффициенты нагрузки испытаний для различных материалов, в соответствии со стандартом DIN EN ISO 6506-1 [4].

При обозначении твердости по Бринеллю численные данные сопровождаются кодом процедуры, диаметром шарика в мм и силой испытания в Н, умноженной на 0,102 (например, 600 HBW 1/30).

Высокие значения испытательных усилий, распространяющиеся на относительно большую площадь поверхности, могут использоваться для сбора данных по материалам с неоднородной структурой. Преимущество метода Бринелля заключается в относительно высо-

Таблица 1. Применение данных испытаний твердости по Бринеллю

Материал	Твердость по Бринеллю	Коэффициент нагрузки 0,102 F/D^2
Сталь, никель, титановые сплавы		30
Чугун (номинальные диаметры шарика – 2,5, 5 или 10 мм)	< 140	10
	≥ 140	30
Медь и медные сплавы	< 35	5
	35–200	10
	> 200	30
Легкие металлы и их сплавы	< 35	2,5
	35–80	5 10 15
	> 80	10 15
Свинец и олово		1
Металлокерамика	См. нормы DIN EN ISO 4498 [5]	

кой степени корреляции между показателями твердости и пределом прочности на разрыв.

Необходимые подготовительные работы и последующие операции испытаний являются более сложными, чем при испытании по методу Роквелла.

Твердость по Виккерсу (DIN EN ISO 6507, [6])
Данный метод испытаний может использоваться для всех металлических материалов, независимо от твердости. Он наиболее подходит для испытаний мелких и тонких образцов, хотя область его применения распространяется на детали, прошедшие поверхностную закалку и химико-термическое упрочнение, а также на обрабатываемые заготовки, подвергшиеся азотированию.

Инструментом является октаэдрическая алмазная пирамида с углом при вершине 136°. Она прикладывается к поверхности испытуемого образца при определенном значении усилия F. Диагонали d_1 и d_2 отпечатка, имеющего форму ромба, измеряется с помощью микроскопа и непосредственно используется для определения значения твердости по Виккерсу, которое можно получить из табличных данных или подсчитать по формуле:

$$HV = \frac{2F\sin\frac{136}{2}}{d^2} \approx 0{,}1891\,\frac{F}{d^2},$$

где F – прикладываемая сила, Н;
d – среднеарифметическое значение длин диагоналей d_1 и d_2, мм.

В обозначении твердости по Виккерсу после аббревиатуры HV приводится значение силы в Н (помноженной на показатель 0,102) и времени приложения силы в секундах, в случае если оно отличается от стандартных 15 с (например: 750 HV 10/25).

Поверхность испытуемого образца должна быть гладкой и плоской. В DIN EN ISO 6507 [6] оговаривается, что показатели внесения поправок должны использоваться для компенсации ошибок, возникающих из-за кривизны поверхности. Уровни испытательных усилий подбираются со ссылкой на толщину проверяемого образца или параметры внешнего закаленного слоя.

Основное преимущество метода: возможность оценки тонких деталей или слоев. Числа Бринелля и Виккерса коррелируют приблизительно до 350 HV.

Метод Виккерса обеспечивает приблизительно такой же уровень точности, как и метод Бринелля, хотя в обоих случаях процесс измерения крайне чувствителен к каким-либо перемещениям испытательной установки. Это позволяет использовать чрезвычайно малые значения силы для определения твердости отдельных структурных элементов. Испытательный инструмент метода Виккерса является более дорогим, чем шарики, используемые по методу Бринелля. Метод Виккерса обеспечивает приблизительно такой же уровень точности, как и метод Бринелля, хотя в обоих случаях процесс измерения крайне чувствителен к каким-либо перемещениям испытательной установки.

Твердость по Кнупу (DIN EN ISO 4545, [7])
Этот процесс измерения напоминает метод Виккерса. Испытательное оборудование предназначено для получения отпечатка в виде тонкого удлиненного ромба. Длинная диагональ d отпечатка, образуемого после приложения силы F, в семь раз длиннее маленькой. Значения твердости можно получить из стандартных диаграмм или вычислить по формуле:

$$HK = 1{,}451\,\frac{F}{d^2},$$

где F – прикладываемое усилие, Н;
d – большая диагональ, мм.

При обозначении твердости по Кнупу числовое значение сопровождается сокращением НК, затем указываются сила испытания в Н, умноженная на коэффициент 0,102, и, если необходимо, через разделенную косую черту, – время приложения силы в секундах (например, 640 НК 0,1/20).

Глубина проникновения по Кнупу в 1/3 раза меньше, чем по Виккерсу, благодаря чему оценку поверхностной твердости можно выполнять для более тонких деталей и слоев. Недостаток метода состоит в точной регулировке поверхности образца, которая должна быть установлена строго под прямым углом по отношению к оси прикладываемой силы. Испытания по Кнупу часто проводятся на хрупких материалах, таких как, например, керамические и спеченные материалы.

Твердость по Шору (DIN 53505, [8])
Метод используется, в основном, для испытаний на твердость резиновых изделий и мягких пластиков. В качестве инструмента используется стальной штырь диаметром 1,25 мм, который вдавливается в поверхность образца с помощью пружины с последующим изменением длины пружины.

Глубина проникновения стального штыря в анализируемом материале является мерой твердости по Шору. Этот показатель измеряется

по шкале от 0 (глубина проникновения – 2,5 мм) до 100 (глубина проникновения – 0 мм).

По А-методу Шора инструмент тестирования имеет форму усеченного конуса. Диаметр стального штыря составляет 0,79 мм, угол конуса – 35 °. По D-методу Шора измерение производится с помощью иглы, острие которой имеет угол 30 ° и радиус 0,1 мм.

Твердость по отпечатку шариком (DIN ISO 2039, [9])

Это – стандартное испытание для определения уровней твердости в пластомерах или материалах из твердой резины. Инструментом является закаленный стальной шарик диаметром 5 мм. Он прикладывается к поверхности испытываемого образца с предварительным нагружением в 9,8 Н. Образец должен иметь толщину, по крайней мере, 4 мм. Затем последовательно прикладываются возрастающие усилия в 49, 132, 358 и 961 Н. По истечении 30 с замеряется глубина проникновения. Прикладываемая нагрузка F должна выбираться таким образом, чтобы величина глубины проникновения h находилась в пределах от 0,15 до 0,35 мм. Значение твердости HB в Н/мм2 можно рассчитать или получить из стандартных диаграмм.

Твердость по Мартенсу (DIN EN ISO 14577, [10])

По этому методу проникновением инструментом в форме пирамиды в материал оцениваются пластическая и упругая деформации. Твердость по Мартенсу в Н/мм² определяется как отношение силы испытания F к площади боковой поверхности внедренной в материал части индентора A_s, рассчитываемой по глубине проникновения индентора h.

Твердость по Мартенсу обозначается аббревиатурой HM, после которой указываются сила испытания в Н, время нагружения при индентировании в секундах и время выдержки под нагрузкой в секундах (например, HM 0,5/20/20 = 8700 Н/мм²).

Определение твердости склероскопом

Динамический метод измерений склероскопом применяется для определения твердости тяжелых и крупногабаритных металлических изделий. Этот процесс, в основном, базируется на измерении высоты отдачи (энергии удара) стального индентора (молотка), снабженного алмазным или твердосплавным наконечником и падающего с заданной высоты на поверхность образца. Высота отдачи служит основой для определения твердости склероскопом.

Метод не стандартизирован и не имеет непосредственной корреляционной связи с каким-либо другим методом испытания твердости.

Таблица 2. Технологические процессы термической обработки

Закалка	Изотермический распад аустенита	Отпуск	Термохимическая обработка	Отжиг	Дисперсионное упрочнение
Сквозная закалка	Изотермическое превращение в бейнит	Отпуск закаленного материала	Цементация	Снятие напряжений	Старение пересыщенного твердого раствора
Поверхностная закалка		Закалка и отпуск при температуре свыше 550 °C	Карбонитрирование	Рекристаллизация	
Закалка цементированных поверхностей (химико-термическое упрочнение)			Азотирование	Сфероидизация цементита	
			Нитроцементация	Нормализация	
			Борирование	Диффузионный отжиг	
			Хромирование		

Процессы термической обработки

Термическая обработка применяется для придания металлическим инструментам специфических качеств, требуемых при металлообработке. Таким требованиям отвечают технологические процессы производства, обеспечивающие заданные свойства материала для выполнения соответствующих функций.

В соответствии со стандартом DIN EN 10052 [11], термическая обработка включает «обработку заготовки целиком или по частям за один или несколько временных и температурных циклов, для того чтобы привести к изменению свойств ее структуры. Если необходимо, во время обработки может быть изменен химический состав материала».

В результате термической обработки модифицируется микроструктура металла с достижением соответствующих твердости, прочности, пластичности, сопротивляемости изнашиванию и т.п., требуемых для преодоления напряжений, связанных со статическими и динамическими нагрузками. Наиболее важные технологические процессы приведены в табл. 2 (для получения сведений по терминологии см. DIN EN 10052, [11]).

Закалка

Технология закалки позволяет получить мартенситную микроструктуру очень высокой твердости и прочности в железных сплавах, таких как сталь и графитизированный чугун. Этот процесс состоит из отдельных операций, известных как образование аустенита и охлаждение или закалка.

Таблица 3. Стандартные значения температуры образования аустенита

Тип стали	Спецификация качества [14, 15, 16, 17, 18]	Температура образования аустенита, °C
Нелегированные и низколегированные стали при < 0,8 % по массе углерода	DIN EN 10083-1, 10083-2, 10083-3, 10085	780–950
Нелегированные и низколегированные стали при ≥ 0,8 % по массе углерода		750–820
Инструментальные стали при холодном и горячем деформировании	DIN EN ISO 4957	780–1150
Быстрорежущие стали		1150–1300

Сквозная закалка

Заготовка нагревается до температуры образования аустенита или до температуры закалки (табл. 3), при которой заготовка выдерживается, пока не появится аустенитная структура, и пока соответствующее количество углерода (образованного при распаде карбидов, таких как графит в чугуне) не растворится в рассматриваемом материале. После образования аустенита заготовка охлаждается с интенсивностью, достаточной для того, чтобы закалиться, что может происходить в течение нескольких этапов с разной температурой. Полное преобразование в мартенситную микроструктуру должно быть закончено как можно быстрее. Необходимый процесс охлаждения определяется химическим составом, условиями образования аустенита, формой и размерами заготовки и желаемой микроструктурой. Справочные данные для необходимого уровня охлаждения могут быть найдены на диаграмме изотермического превращения аустенита для рассматриваемой стали.

Температура образования аустенита изменяется в соответствии с составом рассматриваемого материала (для получения конкретных данных см. «Технические требования к стали DIN»). В табл. 3 приведены эталонные данные. Для получения сведений по практике операций закалки для инструментальных сталей и различных инструментов см. DIN 17 022, часть 1 [12] и часть 2 [13].

Не все типы сталей и чугунов подходят для закалки. В следующем уравнении приводится описание потенциала закалки для легированных и нелегированных сталей с содержанием углерода 0,15–0,60 % по массе, и он может использоваться для оценки твердости, достигаемой при полностью мартенситной микроструктуре:

$$\text{Максимальная твердость} = (35 + 50x \pm 2)\ \text{HRC} \quad \text{(уравнение 1)},$$

где x – содержание углерода в % по массе. Если микроструктура не полностью состоит из мартенсита, то максимальной твердости достичь невозможно.

Когда содержание углерода превышает 0,6 % по массе, то можно предположить, что структура материала содержит в дополнение к мартенситу остаточный аустенит. Максимальной твердости при этом условии получить нельзя и, соответственно, нельзя достичь высокой сопротивляемости изнашиванию. Остаточный аустенит является

нестабильным, то есть существует возможность для последующих превращений в мартенсит при температуре, меньшей комнатной, или при снижении внутренних напряжений с изменением объема. Операции отпуска при температурах свыше 230 °С могут быть полезны в случаях, когда остаточный аустенит является неизбежным продуктом закалки. Во время закалки происходит перепад температур между краем и сердцевиной заготовок. С большими поперечными сечениями уменьшенный уровень охлаждения в сердцевине может послужить началом уменьшения твердости по мере удаления от поверхностных. Иными словами, существует прогрессия твердости или градиент. Градиент твердости зависит от состава материала и степени закалки, зависящей от условий образования аустенита (согласно испытаниям по DIN EN 642, [19]). В этом случае для получения необходимой твердости следует использовать материал с достаточной закаливаемостью. Информация о выборе стали, подвергаемой закалке, имеется в DIN 17021 [20].

В DIN EN ISO 18265 [21] приводятся данные по определению твердости, используемой для оценки прочности на разрыв Rm. этот метод может применяться только для случаев, когда поверхностная и внутренняя твердости фактически равны.

При закалке, а также обработке, приводящей к мартенситной структуре происходит увеличение объема заготовки. По сравнению с первоначальным состоянием, объем увеличивается примерно на 1%. Это приводет к изменению длины примерно на 0,3 %.

Изменения объема заготовки, связанные с перегруппировкой структуры и градиентом температуры при охлаждении, приводят к напряжениям, которые, в свою очередь, могут привести к искажениям в виде изменений размеров и формы. Напряжения, которые остаются в заготовке после закалки, называются внутренними напряжениями. Края закаленной заготовки имеют тенденцию к появлению внутреннего напряжения при растяжении, в то время как сердцевина, как правило, обладает внутренним напряжением сжатия.

Поверхностная закалка

Этот процесс наиболее подходит для объединения с другими операциями производства и может подстраиваться к ритму технологической линии.

Нагрев при закалке ограничивается поверхностью, таким образом, изменения формы и размеров сведены к минимуму. Нагрев обычно осуществляется переменным током высокой или средней частоты (индукционная закалка) или с использованием газовой горелки (пламенная закалка). Трение (закалка трением) и лучи высокой энергии (например, электронные или лазерные) могут также обеспечивать разогрев поверхности с образованием аустенита. В табл. 4 приведены краткие данные специфических видов тепловой энергии для отдельных процессов.

Эти методы могут использоваться для обработки как простых, так и сложных поверхностей, находящихся как в неподвижном состоянии, так и во время движения. При этом источник тепла также должен перемещаться. Наилучшим способом, связанным с обработкой радиально-симметричных деталей, является вращение, благодаря которому обеспечивается концентрическая закалка. Для охлаждения могут применяться операции погружения образца в охлаждающую жидкость или ее распыления. Информацию о выполнении упрочнения поверхности можно найти в DIN 17022–5 [22].

Также для закалки могут применяться установки спрейерного типа. Температуры при поверхностной закалке должны быть на 50–100 °С выше, чем те, что используются при нагреве в печах, с целью обеспечения очень быстрого разогрева. Данный процесс обычно охватывает малоуглеродистые или нелегированные стали с содержанием углерода порядка 0,35–0,60% по массе. Однако,

Таблица 4. Удельная мощность нагрева различными источниками тепла

Источник тепла	Нормальная удельная мощность, Вт/см^2
Лазерный луч	10^3.. 10^4
Электронный луч	10^3.. 10^4
Индукционный нагрев (среднечастотные и высокочастотные импульсы)	10^3 .. 10^4
Разогрев открытым пламенем	10^3 .. 6 10^3
Плазменный луч	10^4
Конвекция тепла в соляной раствор	20
Конвекция тепла через воздух или инертный газ	0,5

поверхностной закалке также могут подвергаться легированные стали, чугун и стали, применяемые в подшипниках качения. При таком виде обработки может быть обеспечено сочетание высоких прочности и поверхностной твердости детали, в том числе и в местах, имеющих высокие напряжения (скрытые или потайные концентраторы напряжений, несущие поверхности, поперечные сечения переходных деталей).

Поверхностная закалка применяется в местах концентрации внутренних напряжений сжатия для обеспечения повышенной усталостной прочности, особенно в тех случаях, когда переменным напряжениям подвергаются детали с отверстиями или другими концентраторами напряжений. Напряжение, показанное на рис. 2, соответствует напряжению при изгибе. Напряженное состояние детали снижается с наложением напряжений при изгибе и внутренних напряжений.

Зависимость, определенная в уравнении 1, может быть использована для оценки потенциальной твердости поверхности. Между поверхностным слоем и внутренней незакаленной областью детали обычно имеется существенная разница в твердости. Глубина закалки DS, при которой твердость по Виккерсу изменяется не более чем на 80%, может быть выведена из кривой прогрессии твердости (см. DIN EN 10328, [23]).

Рис. 2. Знакопеременные напряжения, соответствующие закалке поверхностных слоев:
+σ – растягивающее напряжение,
–σ – сжимающее напряжение;
1 – слой, прошедший термическую обработку; 2 – напряжение при изгибе; 3 – уменьшение растягивающего напряжения; 4 – результирующее напряжение, 5 – внутреннее напряжение; 6 – увеличение нормального напряжения сжатия



Изотермическая закалка на аустенит

Цель данного процесса – создание бейнитной микроструктуры. Бейнит не является настолько твердой структурой, как мартенсит, однако обладает большей пластичностью, а также меньшей склонностью к изменениям удельного объема.

После образования аустенита (см. раздел «Закалка»), детали, предназначенные для закалки на бейнит, подвергаются охлаждению до температуры 200 ...350 °C (в зависимости от состава материала) с определенной скоростью. Затем детали выдерживаются при этой температуре до тех пор, пока не закончится превращение аустенита в бейнит. После этого детали могут быть охлаждены до комнатной температуры (при этом специального режима охлаждения не требуется).

Закалка на бейнит эффективна для деталей, чья геометрическая поверхность чувствительна к концентраторам напряжений или трещинам, или в случае, когда требуется иметь высокую пластичность вместе со значительной твердостью.

Применение

Головки цилиндров в современных дизельных насосах высокого давления для систем Common-Rail, которые должны быть способны избегать высокого износа и внутренних сжимающих напряжений, имеют изотермическую закалку на аустенит.

Отпуск

Отпуск закаленных компонентов и инструментов используется для повышения их деформируемости и снижения риска растрескивания. В соответствии с DIN EN 10052 [24] отпуск включает нагрев в один или несколько этапов до температуры отпуска, выдерживание при этой температуре, а затем охлаждение соответствующим образом. Отпуск осуществляется от комнатной температуры до температуры Ac_1, т.е. до той температура, при которой будут созданы аустенитные структурные составляющие.

Отпуск при температурах порядка 180 °C является достаточным для уменьшения твердости нелегированной или низколегированной стали приблизительно на 1–5 HRC. Отдельные материалы реагируют при более высоких температурах с характерными потерями твердости. На рис. 3 показаны характерные кривые отпуска для различных марок сталей. Эти кривые иллюстрируют тот факт, что твердость сталей со специальными легирующими элементами (Mo, V, W) – такая же, как, например,

у горячекатонной или быстрорежущей инструментальной стали – увеличивается в температурном диапазоне от 400 до 600 °С до величин, которые могут быть выше твердости закалки (вторичная закалка).

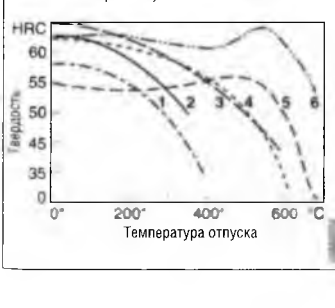
Зависимость между температурой отпуска, с одной стороны, и твердостью, прочностью, текучестью, пределом сжатия и растяжения может быть взята из диаграммы отпуска для различных сталей (см., например, DIN EN 17021, [25]).

Вообще говоря, отпуск уменьшает твердость и прочность и увеличивает деформируемость. Внутренние напряжения также могут быть уменьшены закалкой при температуре свыше 300 °С.

Объем уменьшается, когда отпускаются структуры, которые становятся свободны от остаточного аустенита. При этом для структур, содержащих остаточный аустенит, характерно увеличение объема, которое происходит при переходе от остаточного аустенита в мартенсит. Твердость увеличивается, деформируемость уменьшается, и могут быть созданы новые внутренние напряжения. Также увеличивается риск образования трещин

Следует помнить, что стали, легированные марганцем, хромом и никелем или комбинацией этих элементов, не должны отпускаться при температурах 350–550 °С, так как это может привести хрупкости. Когда эти типы материалов охлаждаются после закалки, производимой при температурах свыше 550 °С, переход через этот критический диапазон должен также осуществляться как можно быстрее (для получения дополнительной информации см. DIN 17022, части 1 и 2 [12, 13]). Этой чувствительности к закалке можно избежать использованием в качестве легирующих элементов молибдена и вольфрама.

Рис. 3. Характерные кривые отпуска для различных марок сталей:
1 – нелегированная отпущенная сталь (C45); 2 – нелегированная сталь для штампов холодного деформирования (C80W2); 3 – низколегированная сталь для штампов холодного деформирования (105WCr6); 4 – легированная сталь для штампов холодного деформирования (X165CrV12); 5 – сталь для штампов горячего деформирования (X40CrMoV51); 6 – быстрорежущая инструментальная сталь (S6–5–2)



Закалка и отпуск

Закалка и отпуск предполагают сочетание этих двух операций при температуре, которая, как правило, находится в диапазоне от 540 до 680 °С. Эта процедура предназначена для достижения оптимального соотношения между прочностью и пластичностью. Она применяется в тех случаях, когда требуются предельные значения пластичности и ковкости.

Особое внимание должно быть уделено тому, чтобы при выполнении операций закалки и отпуска избежать хрупкости.

Отжиг

Отжиг может применяться для оптимизации определенных эксплуатационных и технологических свойств деталей. С помощью этого метода, детали нагреваются до определенной температуры, выдерживаются в течение достаточного времени, после чего охлаждаются до комнатной температуры. Ниже приведены наиболее важные с точки зрения технологии процессы отжига.

Снятие напряжений при отжиге

В зависимости от точного состава материала, снятие напряжения при отжиге производится в диапазоне температур от 450 до 650 °С. Конкретной целью является снижение внутренних напряжений в компоненте, инструменте или отливке..

Рекристаллизационный отжиг

Применяется для деталей, изготовленных без использования металлорежущих инструментов. Требуемый диапазон температур зависит от состава материала и степени деформации: для стали он находится в пределах 550 …730 °С.

Мягкий отжиг

Цель мягкого отжига – улучшение обрабатываемости материалов, которые с трудом поддаются механической обработке или холодной штамповке. Процесс заключается в нагреве материала до температуры свыше 600 °С, кратком нагреве до температуры

свыше Ac_1, выдерживании при этой температуры и медленном охлаждении до комнатной температуры.

Требование к температуре определяется составом материала. Она колеблется в диапазоне от 650 до 850 °С для стали и может быть ниже для цветных металлов и сплавов.

Получение шаровидного цементита (карбид железа) применяется, когда требуется создать микроструктуру с зернистой формой карбида. Если начальной структурой является мартенсит или бейнит, то результатом будет гомогенное распределение карбида.

Нормализация

Проводится посредством нагрева деталей до температуры образования аустенита с последующим постепенным охлаждением на воздухе до комнатной температуры. Низколегированные и нелегированные стали в результате этого получают структуру, состоящую из феррита и перлита. Этот процесс необходим для уменьшения размера зерен, предотвращения выделений цементита по границам зерен и обеспечения максимальной однородности распределения феррита и перлита.

Старение

Этот процесс представляет собой термообработку для перевода второго компонента в твердый раствор с последующим старением при температуре окружающего воздуха. Детали нагреваются и затем выдерживаются при определенной температуре в целях перевода структурных компонентов в твердый раствор и подвергаются закалке для образования сверхнасыщенного раствора. Процесс старения включает в себя один или несколько циклов, в течение которых материал нагревается и выдерживается при температурах, превышающих температуру окружающего воздуха (горячее старение). Во время этого процесса одна или несколько фаз формируются и осаждаются в матрице.

Выделяющиеся частицы повышают твердость и прочность базовой микроструктуры. Фактические характеристики металла определяются температурой и продолжительностью процесса старения; превышение определенного максимума обычно позволяет уменьшить прочность и твердость конечного продукта.

Старение чаще всего применяется для сплавов цветных металлов, однако некоторые сорта стали также подвергаются этой обработке.

Применение

Стали, подверженные старению, используются, например, в датчиках измерения давления в топливной рампе в аккумуляторной топливной системе типа Common-Rail.

Химико-термическая обработка

Во время химико-термической обработки детали погружаются в среду, элементы которой диффундируют в поверхностный слой детали и модифицируют структуру поверхностного слоя. Особо важными для этого процесса являются среды, включающие углерод, азот и бор.

Цементация, карбонитрирование, другие типы химико-термического упрочнения поверхности

Цементация повышает содержание углерода в поверхностном слое, в то время как карбонитрирование к обогащению углеродом дополняет азот. Этот процесс обычно проводится в соляных ваннах, в атмосфере с гранулированным составом или в газовой среде при температурах, изменяющихся от 850 до 1000 °С. Закалка выполняется одновременно с химико-термическим упрочнением при температуре науглероживания или карбонитрирования (прямая закалка), или путем непосредственного охлаждения до комнатной температуры (одиночная закалка), или во время непосредственного охлаждения деталей до подходящей промежуточной по значению температуры перед повторной обработкой нагревом (закалка после изотермического превращения, например, при температуре 620 °С) до температуры закалки. Этот процесс позволяет получить мартенситный поверхностный слой, хотя количество мартенсита в приповерхностных слоях представляет собой функцию температуры закалки, прокаливаемости и толщины детали.

При этом должны выбираться конкретные значения температуры как для поверхностной закалки в верхних приповерхностных слоях с более высоким содержанием углерода (случай обогащения), так и для ненауглероженных внутренних частей детали (обогащение внутренних частей) (см. DIN 17022, часть 3). Расстояние между поверхностью и точкой, в которой массовое содержание углерода составляет 0,35%, обычно определяется как глубина науглероживания или цементации.

От требуемой глубины науглероживания, температуры и атмосферных характеристик диффузии углерода (его потенциала в среде) зависит продолжительность процесса цементации или карбонитрирования.

Типичное содержание углерода в цементированном поверхностном слое находится в диапазоне от 0,5 до 0,85% по массе. Концентрация углерода, по сути, определяет твердость поверхности.

В общем случае целью химико-термической обработки является достижение массового содержания углерода 0,5–0,85% с получением достаточно высокой поверхностной твердости. Более высокие концентрации углерода могут привести к сохранению остаточного аустенита и/или выделению фазы, что может негативно сказаться на качестве детали. Таким образом, очень важным фактором при термической обработке является контроль атмосферного уровня углерода и, в итоге, окончательного содержания углерода в детали.

Наиболее распространенными процессами цементирования, используемыми сегодня, являются газовая цементация и вакуумная цементация. В случае газовой цементации, уровень углерода в атмосфере печи регулируется таким образом, чтобы поверхностный слой заготовки получал необходимую концентрацию углерода. Устанавливается состояние равновесия с окружающей атмосферой печи. При вакуумной цементации, с другой стороны, содержание углерода не может быть таким образом отрегулированным. В этом случае содержание углерода регулируется с помощью многоступенчатого цементирования. На первом этапе цементирование осуществляется при очень высоком содержании углерода в диапазоне физического насыщения. На следующем этапе это высокое содержание углерода уменьшается путем диффузии до нужного уровня. На практике процесс вакуумной цементации состоит из нескольких последовательных этапов цементирования и диффузии.

Градиент, определяющий зависимость твердости от глубины, соответствует кривой концентрации углерода. Для оценки этого используется понятие глубины цементации CHD. В стандарте DIN EN ISO 2639 [27] она определяется как максимальное расстояние от поверхности, при которой твердость падает ниже 550 HV.

Деталь, прошедшая химико-термическую обработку и закалку, испытывает, в основном, напряжения сжатия на поверхности и растяжения во внутренних слоях детали. Как и в случае с поверхностной закалкой, такая схема распределения напряжений обеспечивает повышенную сопротивляемость вибрационным нагрузкам

Азот, поглощаемый во время карбонитрирования, служит для улучшения поведения материала при отпуске, повышает его долговечность и усиливает стойкость к износу. Положительное влияние азота наиболее выражено для нелегированных сталей. Дополнительную и более подробную информацию по операциям закалки с химико-термическим упрочнением см. в DIN 17022, часть 3 и в информационном листе 452 Информационного центра стали, Дюссельдорф [28].

Применение

Форсунки аккумуляторной топливной системы Bosch Common-Rail, способные выдержать высокий износ и внутренние сжимающие напряжения, закаляются путем вакуумной цементации.

Азотирование и нитроцементация

Азотирование – процесс химико-термической обработки (в температурном диапазоне 400–600 °C), используемый для обогащения поверхностного слоя железных сплавов азотом. Во время нитроцементации в материал диффундирует и определенное количество углерода.

Молекулярный азот, находящийся в указанном диапазоне температур газообразного азота, не может диффундировать в металлические материалы. Поэтому необходимо, чтобы это происходило с помощью подходящего донора. На практике процессы азотирования и нитроцементации выполняются в газовой атмосфере, содержащей аммиак, в плазме, содержащей азот или даже в расплавленных солевых растворах, содержащих цианат. Газовые выбросы аммиака способствуют диффундированию азота во время его термического распада. В плазме азот ионизируется, что также способствует диффузии атомов азота.

Обогащение азотом поверхностного слоя вызывает осаждение нитридов, в результате чего поверхностный слой затвердевает. В конечном счете, это приводит к большей стойкости к износу и коррозии и к большей усталостной прочности. Так как процесс происходит при сравнительно низких температурах, нет объемных изменений, связанных с преобразованиями в микроструктуре, так что изменения размеров и формы минимальны.

Азотированная зона включает поверхностный слой толщиной в несколько миллиметров и осветленный переходный слой, твердость которого может находиться в пределах от 700 до 1200 HV и выше в зависимости от состава материала. При этом чем больше расстояние от поверхности, тем мягче диффузионный слой, толщина которого составляет несколько десятых миллиметра. Толщина отдельных слоев определяется температурой и продолжительностью процесса обработки. В результате обработки устанавливается градиент твердости, подобный тому, что имеет место при поверхностной закалке и химико-термической обработке с закаливанием; этот градиент служит основой при установлении глубины азотирования. В DIN 50190, часть 3 [29], она определяется как расстояние от поверхности, на котором твердость все еще на 50 HV выше, чем твердость внутри материала.

Сопротивляемость материала к изнашиванию и коррозии, главным образом, определяется наличием осветленного слоя, который содержит до 10% компонентов азота по массе. Азотирование и поверхностная закалка определяют сопротивляемость материала к знакопеременным циклическим напряжениям (для дополнительной информации см. DIN 17022, часть 4 [30] и информационный лист 447 Информационного центра стали, Дюссельдорф [31].

Антикоррозионная стойкость чугуна или нитроцементация заготовок могут быть значительно увеличены окислением в парах воды или других подходящих газах, или в расплавленных солевых растворах при температурах в пределах от 350 до 550 °C.

Применение

Форсунки, используемые, например, в аккумуляторных топливных системах Bosch Common-Rail, способные выдерживать резкие перепады температур, подвергаются газовому азотированию. Компоненты для очистителя ветрового и заднего стекол нитроцементируются для повышения их устойчивости к коррозии и износу. После обработки эти компоненты приобретают характерный черный цвет.

Обрабатка бором

В зависимости от продолжительности и температуры (обычно 850–1000 °C), получают железоборный осветленный слой глубиной от 30 мкм до 0,2 мм и твердостью 2000–2500 HV.

Борирование является наиболее эффективным средством защиты против абразивного износа, однако высокая температура процесса приводит к относительно большим изменениям формы и размеров обрабатываемой детали.

Применение

Частичное борирование держателей инструментов с высокой износостойкостью используются в ударных сверлах Bosch.

Список литературы

[1] DIN EN ISO 18265: Metallic materials – Conversion of hardness values.
[2] DIN EN ISO 6508: Metallic materials – Rockwell hardness test.
[3] DIN EN ISO 6506: Metallic materials – Brinell hardness test.
[4] DIN EN ISO 6506-1: Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method.
[5] DIN EN ISO 4498: Sintered metal materials, excluding hardmetals – Determination of apparent hardness and microhardness.
[6] DIN EN ISO 6507: Metallic materials – Vickers hardness test.
[7] DIN EN ISO 4545: Metallic materials – Knoop hardness test.
[8] DIN 53505: Testing of rubber – Shore A and Shore D hardness test.
[9] DIN ISO 2039: Plastics – Determination of hardness.
[10] DIN EN ISO 14577: Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
[11] DIN EN 10052: Vocabulary of heat treatment terms for ferrous products.
[12] DIN 17022-1: Heat treatment of ferrous materials – Methods of heat treatment – Part 1: Hardening, austempering, annealing, quenching, tempering of components.
[13] DIN 17022-2: Heat treatment of ferrous materials; heat treatment methods; hardening and tempering of tools.
[14] DIN EN 10083-1: Steels for quenching and tempering – Part 1: General technical delivery conditions.
[15] DIN EN 10083-2: Steels for quenching and tempering – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy steels.
[16] DIN EN 10083-3: Steels for quenching and tempering – Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels.
[17] DIN EN 10085: Nitriding steels – Technical delivery conditions.
[18] DIN EN ISO 4957: Tool steels.
[19] DIN EN ISO 642: Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test).
[20] DIN 17021: Heat treatment of ferrous materials.
[21] DIN EN ISO 18265: Metallic materials – Conversion of hardness values.
[22] DIN 17022-5: Heat treatment of ferrous materials – Methods of heat treatment – Part 5: Surface hardening.
[23] DIN EN 10328: Iron and steel – Determination of the conventional depth of hardening after surface hardening.
[24] DIN EN 10052: Vocabulary of heat treatment terms for ferrous products.
[25] DIN 17021: Heat treatment of ferrous materials; material selection, steel selection according to hardenability.
[26] DIN 17022-3: Heat treatment of ferrous materials; heat treatment methods. case hardening.
[27] DIN EN ISO 2639: Steels – Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases.
[28] Information Sheet 452 of the Steel Information Center, Dusseldorf: "Einsatzharten", Edition 2008.
[29] DIN 50190-3: Hardness depth of heat-treated parts; determination of the effective depth after nitriding.
[30] DIN 17022-4: Heat treatment of ferrous materials – Methods of heat treatment – Part 4: Nitriding and nitrocarburizing.
[31] Information Sheet 447 of the Steel Information Center, Dusseldorf: "Warmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarburieren", Edition 2005.

Коррозия и защита от коррозии

Процессы коррозии

Коррозия – это разрушение металлов в результате их химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. В процессе протекания этих реакций на поверхности металла адсорбируют окислительные компоненты: молекулы кислорода, углерода, азота и др. С позиций термодинамики процесс развития коррозии можно рассматривать как энтропию с передачей энергии от состояния высшего уровня к низшему, обладающему большей устойчивостью.

Процессы коррозии всегда проходят в виде межфазных реакций. Примером таких реакций является образование металлической окалины, то есть окисление в атмосфере нагретых газов. Таким же образом происходит коррозия на границе металла с водной фазой, обычно характеризуемая как электрохимическая коррозия (рис. 1).

Коррозионное разрушение

При коррозионном разрушении развиваются две характерные реакции – анодирование и окисление металла, описываемые следующим уравнением:

$$Me \rightarrow Me^{n+} + ne^-$$

с высвобождением эквивалентного количества электронов. Ионы металла, образуемые таким образом, могут растворяться в электролите или осаждаться на металлической поверхности, подвергающейся коррозионному разрушению.

Анодный процесс продолжается до тех пор, пока высвобождающиеся электроны поглощаются во время реакции окисления. В катодном процессе происходит уменьшение кислорода и образование гидроксильных ионов в нейтральной или алкалиновой среде в соответствии с уравнением:

$$O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^- \rightarrow 4\,OH^-$$

Гидроксильные ионы, в свою очередь, могут вступать в реакцию с ионами металла в кислой среде, где происходит образование свободного водорода, выделяемого в виде газа в соответствии с уравнением:

$$2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow H_2.$$

Каждый из этих процессов соответствует своей зависимости ток-напряжение, а общая сила тока складывается из показателей силы тока анодного I_a и катодного I_k процессов (рис. 2):

$$I_{total} = I_a + I_k$$

Для получения обобщающей зависимости силы тока от напряжения аналогичные частные зависимости обоих процессов объединяются.

Если в зону контакта не подводится внешнее напряжение, то есть протекает процесс свободной коррозии, система находится в равновесном состоянии, когда сила тока анодного и катодного процессов сбалансированы:

$$I_a = -I_k = I_{corr}$$

В этом случае анодный ток называют током коррозии Icorr, а соответствующую величину напряжения – «потенциалом открытой цепи» E_{corr}

Потенциал открытой цепи представляет собой смешанный неравновесный потенциал, постоянно преобразуемый в соответствии с уравнением:

$$O_2 + 2H_2O + \frac{4}{n}Me \rightarrow \frac{4}{n}Me^{n+} + 4OH^-$$

Эта закономерность применима для процесса контактной коррозии (рис. 2), хотя взаимосвязь определяющих ее параметров более сложная. В дополнение к частным и общим

Рис. 1. Электрохимическая схема процесса свободной коррозии на поверхности раздела металл/агрессивная среда
В агрессивной среде количество кислорода на корродируемом металле уменьшается, и одновременно образуются продукты коррозии

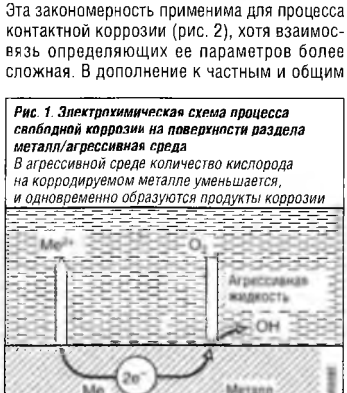
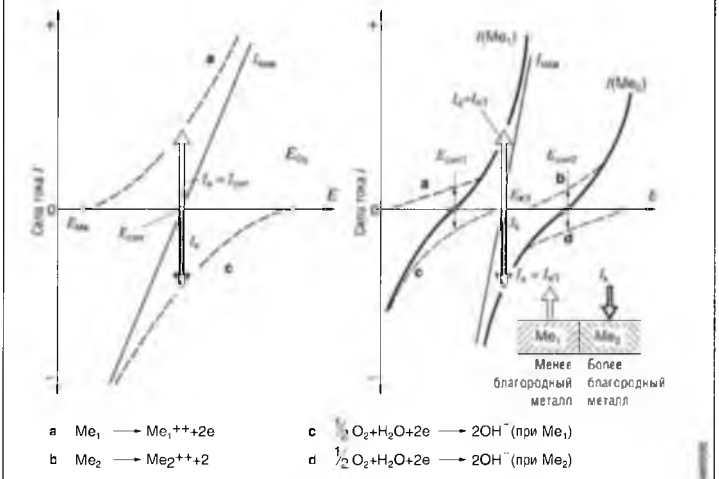


Рис. 2. Частные и общие зависимости силы тока от напряжения для процессов свободной коррозии (в верхней полуплоскости) и контактной коррозии (в нижней полуплоскости))



зависимостям ток-напряжение, для характеристики процесса коррозии необходимо также получить аналогичную результирующую зависимость для всей системы.

Электрохимические ряды металлов

Металлы часто располагают по электромеханическим рядам в соответствии с их стандартным потенциалом (рис. 3). Термин «стандартный потенциал» означает, что параметры металла определены в стандартных условиях, в частности, электрохимическая активность ионов металла и водорода определяется в растворе концентрацией 1 моль/л при давлении водорода 0,1 МПа и температуре 25 °С. Такие условия в природе встречаются редко, в действительности большинство растворов не содержат ионы металла в свободном состоянии.

Следует иметь в виду, что изложенные выше соображения ограничены термодинамической оценкой коррозии и не отражают кинетики процесса, связанного с образованием защитного слоя. При оценке коррозии может использоваться зависимость между электрическим потенциалом металлов и подверженностью их коррозии без приложения внешнего напряжения.

Эта зависимость показывает, как в результате вторичной реакции происходит образование защитного слоя на различных металлах.

Наиболее окисляющиеся (неблагородные) металлы (потенциал менее –0,4 В), например, Na, Mg, Be, Al, Ti и Fe корродируют в нейтральном водном растворе даже при отсутствии кислорода.

Окисляющиеся металлы (потенциал между –0,5 и 0 В), например, Cd, Co, Ni, Sn и Pb корродируют в нейтральном водном растворе в присутствии кислорода и в кислом растворе с образованием водорода даже при отсутствии кислорода.

Полублагородные металлы (потенциал от 0 до +0,7 В), например, Cu, Hg и Ag корродируют во всех растворах только при наличии кислорода.

Благородные металлы (потенциал выше +0,7 В), например, Pd, Pt и Au устойчивы к коррозии.

Эти категории металлов могут подвергаться коррозии при приложении к ним внешнего напряжения.

Виды коррозии

Сплошная поверхностная коррозия

Однородное разрушение металла по всей поверхности контакта подверженных коррозионному воздействию деталей. Это наиболее часто встречающийся вид коррозии, при котором интенсивность корродирования (глубина пораженного коррозией слоя) может быть оценена в единицу времени по величине тока коррозии.

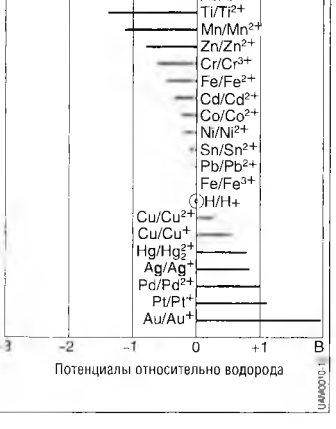
Питтинговая коррозия

Ограниченное местное коррозионное воздействие, проникающее вглубь металла, в результате чего образуются язвы и раковины, глубина которых может значительно превышать их диаметр. При этом практически не происходит поверхностного разрушения металла за пределами точечных поражений и раковин. Точечная коррозия часто вызывается ионами галогенов.

Контактная коррозия

Когда два различных металла, увлажненные агрессивной средой, находятся во взаимном электрическом контакте, катодный подпроцесс происходит в более благородном металле, в то время как анодный подпроцесс прогрессирует в менее благородном материале. Это называют контактной коррозией.

Рис. 3. Стандартные электрические потенциалы металлов



Коррозия трещинами

Коррозионное воздействие, например, вследствие длительного окисления металла, преимущественно проявляющееся в узких трещинах и щелях, вызываемых концентрацией в металле внутренних напряжений. Интенсивность этого вида коррозии возрастает в плохо вентилируемых помещениях.

Коррозия усталостными трещинами

Коррозия, развивающаяся в результате механических нагрузок (возникающих, в том числе, под действием внутренних напряжений растяжения) и непосредственного коррозионного воздействия. Часто при этом в металле возникают корродируемые межкристаллические и транскристаллические трещины, не поддающиеся визуальному обнаружению.

Коррозия вибрационными трещинами

Коррозия, вызываемая одновременно коррозионным воздействием и высокими усталостными напряжениями вследствие вибрации металлических конструкций, с формированием и развитием усталостных трещин, часто невидимых невооруженным взглядом.

Межкристаллическая и транскристаллическая коррозия

Этот вид коррозии характеризуется раздельным ее формированием в направлениях вдоль межкристаллических связей и в плоскости, параллельной упругой деформации кристаллических зерен.

Разрушение цинка

Выборочное разрушение цинка, входящего в состав латуни, в результате чего остается пористая структура медной составляющей сплава. Аналогичным образом вследствие коррозии происходит выделение никеля и алюминия из легированных сплавов.

Испытания на коррозионную стойкость

Электрохимический метод испытания

Применяется для определения величины тока коррозии, достаточной для образования определенной глубины слоя и массы металла, периодически теряемого вследствие коррозии. Также определяется зависимость между напряжением коррозии и свойствами испытываемого металла. Параметры коррозии приведены в табл. 2.

Электрохимический метод испытаний количественными показателями дополняет другие методы оценки коррозионной стойкости металлов.

Измерение сопротивления поляризации

Свободная коррозия определяется на основе величины, соответствующей углу наклона кривой зависимости тока от потенциала открытой цепи. Воздействие на металл при испытаниях – минимальное, изменяются только импульсы анодного и катодного токов.

Импедансная спектроскопия

Для изучения механизма коррозии применяется метод электрохимической импедансной спектроскопии (метод EIS). Этот метод позволяет определить полное сопротивление (импеданс) в цепи переменного тока и угол сдвига фаз испытываемого элемента в функции частоты тока. Низкоамплитудное синусоидальное напряжение переменного тока накладывается на потенциал электрода и производится замер тока реакции. По результатам измерений система, (например, система «агрессивная среда-покрытие-металл», рис. 4) аппроксимируется в схему замещения.

Для обеспечения соответствия схем замещения экспериментальным данным применяется метод подгонки параметров. Элементы импеданса (сопротивление, емкость, индуктивность) задаются физическими свойствами покрытия. На этой основе могут быть сделаны прямые выводы, касающиеся различных характеристик покрытия, а именно – эффективности защиты от коррозии, пористости, толщины, способности абсорбировать воду, эффективности действия ингибиторов коррозии, степени коррозионного разрушения базового металла и т. д.

SRET

Для выявления коррозии на ранних стадиях ее развития и контроля за локальными коррозионными процессами применяется метод сканирования с использованием эталонного электрода (метод SRET).

Примерами местных коррозионных процессов, которые могут в значительной мере изменять механические свойства материала и даже, в исключительных случаях, приводить к его разрушению, являются трещины, питтинг и межкристаллическая коррозия. Для таких процессов характерны высокая степень локального коррозионного разрушения и изменение локального электрического потенциала.

На принципиальной схеме метода SRET (рис. 5) показаны линии равных потенциалов в локальном очаге активной коррозии. Для сканирования сигналов из зоны коррозии используется датчик, который состоит из двух зафиксированных на поворачивающемся щупе и смещенных друг относительно друга платиновых наконечников, чувствительных к микроизменениям электрического потенциала.

Данные автоматически вводятся в компьютер, анализируются и отображаются в виде графиков. Метод SRET применяется для определения точечной коррозии, активации и репассивации, выявления дефектов в сварных соединениях и покрытиях из органических материалов, установления следов расслоения в слоистых материалах и т. п.

Рис. 4. Оценка системы «агрессивная среда-покрытие-металл» методом EIS:
1 – металл; 2 – антикоррозионное покрытие; 3 – агрессивная среда

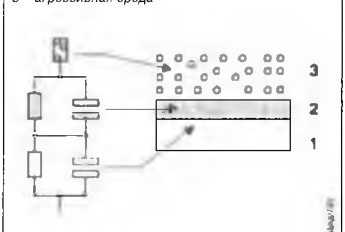


Таблица 1. Нормируемые методы испытаний на коррозионную стойкость

Стандарт	Метод коррозионных испытаний
DIN EN ISO 3651-1 & 2 (заменяет DIN 50 914)	Испытания нержавеющих сталей на межкристаллическую коррозию
DIN EN ISO 4628-3 (проект) 6, 7 & 8	Оценка коррозионного разрушения окрашенных покрытий, часть 3: оценка степени коррозии
DIN 53 210	Обозначение степени коррозии окрашенных покрытий или других подобных покрытий (будет заменен на стандарт DIN EN ISO 4628-3)
DIN EN ISO 8565 (заменяет DIN 50 917-1)	Металлы и сплавы – коррозионные испытания в воздухе
DIN EN ISO 11 306 (заменяет DIN 50 917-2)	Коррозия металлов и сплавов Инструкции для испытания металлов и сплавов в морской воде
DIN 50 016	Метод испытаний в условиях повышенной влажности и при изменяющихся погодных условиях
DIN 50 017	Испытания в атмосфере с конденсацией влаги
DIN 50 018	Испытания в атмосфере с присутствием диоксидов серы
DIN 50 021	Испытания методом распыления солевого раствора
DIN 50 900-2	Коррозия металлов – терминология, часть 3 – электрохимические термины
DIN 50 905-1. .4	Коррозионные испытания; основы, коррозионные характеристики при постоянном и переменном воздействии агрессивных сред и в условиях локального воздействия этих сред без механических напряжений
DIN 50 915	Испытания нелегированных и низколегированных сталей на межкристаллитную коррозию усталостными трещинами в нитратной среде
DIN 50 919	Испытания на контактную коррозию в электролитических растворах
DIN 50 920-1	Испытания на коррозию в потоках жидкостей
DIN 50 922	Испытания металлов на сопротивляемость образованию коррозионных трещин
DIN 50 928	Испытания и оценка защитных металлических покрытий против коррозии в водной среде
DIN EN 10 244-2	Испытания наплавляемых металлических покрытий на провода из стали (олово, сплавы цинка)
N42AP 206	Климатические испытания, испытания в условиях влажного теплого климата и при наличии конденсата влаги
N42AP 209	Климатические испытания; испытания в условиях циклической влажности
N42AP 213	Климатические испытания; испытания в промышленных зонах

Электрохимический шум

Электрохимический шум, который может быть шумом напряжения или тока, следует из микроэлектрохимических действий на поверхности корродируемого металла. Критерием оценки служат небольшие стохастические колебания, производимые соответствующими источниками шума. Это позволяет идентифицировать изменения в системе на очень ранней стадии. Особое преимущество шумовой диагностики состоит

в том, что в системе корродирования отсутствуют какие-либо внешние вмешательства.

Области применения – основные экспертизы местных процессов коррозии, локализация процессов коррозии и контроль коррозии.

Измерение тока контактной коррозии

Для оценки контактной коррозии определяют величину тока, протекающего между двумя погруженными в раствор металлами. Уменьшение силы тока во время электрохимической реакции достаточно полно отражает процесс коррозии на этапе эксплуатационных испытаний.

Преимуществами электрохимического метода измерения контактной коррозии по сравнению с другими методами являются относительно непродолжительное время испытания (один день), небольшой объем необходимого корродирующего раствора (несколько десятых долей литра), получение количественной оценки интенсивности процесса коррозии.

Неэлектрические методы испытаний металлов на коррозионную стойкость

Другие методы испытаний металлов на коррозионную стойкость основаны на определении уменьшения массы образца или уровня образования продуктов коррозии (ржавчины). Стандарт DIN EN ISO 4628–3 (бывший DIN 53210) классифицирует пять различных уровней образования коррозии (табл. 3).

Испытания коррозионной стойкости должны отвечать эксплуатационным требованиям. В дополнение к требованиям стандарта DIN (табл. 1), методы испытаний должны включать и определение некоторых специальных показателей, например, при испытаниях на автомобиле (в разных климатических условиях, при забрызгивании водой топливной системы). Эти ускоренные испытания, имитирующие долговременный режим нагружения в реальных условиях, должны обеспечить получение данных о вероятном сроке службы при обычных эксплуатационных условиях. (такие испытания включают, например, выдерживание тестируемого изделия под воздействием различных климатических условий или проверку работы системы приготовления топливовоздушной смеси под струями воды).

Рис. 5. Принципиальная схема метода SRET:
1 – катод; 2 – анод; 3 – электроны; 4 – ионы металла; 5 – линии равных потенциалов; 6 – платиновые наконечники

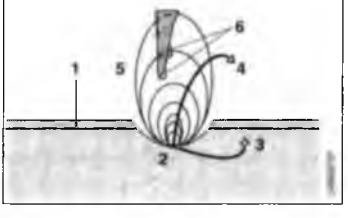


Таблица 2. Потеря массы и глубина коррозии различных металлов при плотности тока коррозии 1 мкА/см²

Металл	Атомная масса	Плотность, г/см³	Потеря массы, мг/(см²·год)	Глубина коррозии, мкм/год
Fe	55,9	7,87	9,13	11,6
Cu	63,5	8,93	10,4	11,6
Cd	112,4	8,64	18,4	21,0
Ni	58,7	8,90	9,59	10,8
Zn	65,4	7,14	10,7	15,0
Al	26,9	2,70	2,94	10,9
Sn	118,7	7,28	19,4	26,6
Pb	207,2	11,3	33,9	30,0

Защита от коррозии

Разнообразие проявлений и механизмов развития коррозии определяет широкий спектр мер по защите металлов от коррозионного разрушения, направленных на уменьшение интенсивности коррозии и увеличение долговечности изделия.

Меры по защите от коррозии можно подразделить на четыре основные категории:

- закладываемые на стадии разработки изделия (выбор соответствующих материалов и конструктивных решений);
- влияющие на процесс коррозии электрохимическим способом;
- обеспечивающие разделение металла и коррозионной среды путем применения защитных покрытий;
- влияющие на саму коррозионую среду, например, путем введения в нее ингибиторов коррозии.

Таблица 3. Уровни образования коррозии и доля поверхности, подверженной коррозионному разрушению (по стандарту DIN EN ISO 4628-3)

Уровни образования коррозии	Доля поверхности, подверженной коррозионному разрушению, %
R_i0	0
R_i1	0,05
R_i2	0,5
R_i3	1
R_i4	8
R_i5	40 – 50

Защита от коррозии на стадии конструирования изделия

Одним из наиболее эффективных способов защиты от коррозии на стадии конструирования является выбор материалов, обладающих повышенной коррозионной устойчивостью. При учете расходов на ремонт, связанных с коррозионным разрушением во время предполагаемой эксплуатации изделия, экономически целесообразней использовать более дорогие материалы в случае, если они более устойчивы к воздействию коррозии.

Также при конструировании бывает важен подбор находящихся в контакте деталей, производимый таким образом, чтобы детали, с точки зрения их коррозионного взаимодействия, состояли из одинаковых или разных материалов.

При конструировании следует учитывать, что во время эксплуатации изделия бывает затруд-

Рис. 6. Правильная и неправильная ориентации деталей с точки зрения исключения коррозии

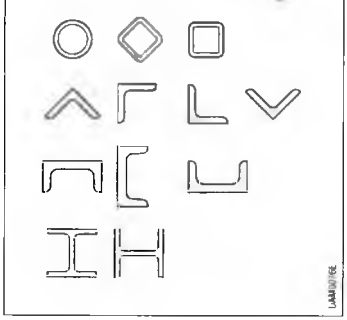
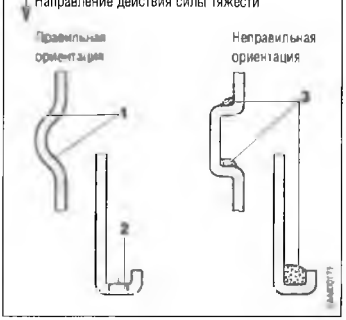


Рис. 7. Конструктивные исполнения отогнутых краев и перегибов:
1 – покатые поверхности (посторонние частицы с них соскальзывают); 2 – глухая щель с дренажным отверстием; 3 – места отложений грязи и влаг



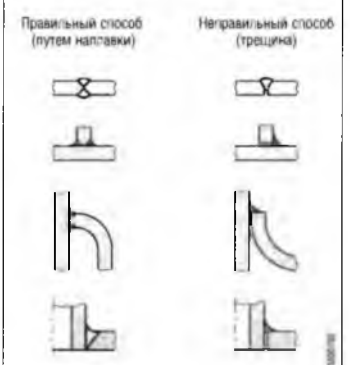
нена коррозионная защита углов и кромок. Снизить коррозию в этих конструктивных элементах может помочь правильная их ориентация относительно действия сил тяжести (рис. 6).

Перегибы и отогнутые края могут собирать грязь и влагу и для борьбы с этим следует располагать поверхности и дренажные отверстия таким образом, чтобы помочь в устранении этой проблемы (рис. 7).

Сварочные швы, которые обычно ухудшают микроструктуру металла, с точки зрения воздействия на них коррозии являются слабым местом. Для того чтобы избежать так называемой щелевой коррозии, сварочные швы должны быть гладкими и сплошными (рис. 8).

Контактная коррозия может быть устранена как за счет применения однородных материалов, так и путем установки шайб, прокладок или втулок, обеспечивающих электроизоляцию между металлами, коррозионноактивными при прямом контакте (рис. 9).

Рис. 8. Способы устранения щелей в сварочных швах



Электрохимический способ

Зависимость тока от напряжения для металлов, поверхность которых подвергается пассивации, иллюстрирует электромеханический способ защиты от коррозии (рис. 10). Кривая плотности тока, восходящая по оси ординат, представляет собой анодный ток реакции окисления, определяемой уравнением:

$$Me \rightarrow Me^{n+} + ne^{-}$$

Кривая плотности тока, нисходящая по оси ординат, представляет собой катодный ток электрохимической реакции коррозии. Для подавления процесса развития коррозии к металлу может быть приложено внешнее напряжение. Реализация электрохимического

Рис. 9. Электроизоляция между металлами для устранения контактной коррозии:
1 – изолирующая шайба; 2 – изолирующая втулка

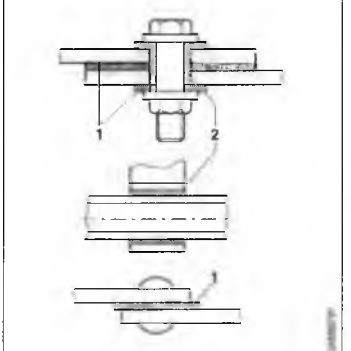


Рис. 10. Схематичная зависимость тока от напряжения в процессе пассивации металлической поверхности:
U_a – свободный потенциал активной коррозии; U_p – потенциал пассивации, U_d – потенциал прорыва



способа защиты от коррозии проходит двумя путями.

При катодной защите потенциал реакции коррозии необходимо сместить в зону отсутствия анодного напряжения ($U < U_a$). В качестве альтернативного решения вместо приложения внешнего напряжения можно использовать основной металл, выполняющий роль анода.

При анодной защите потенциал реакции коррозии необходимо сместить в пассивную область напряжений (между U_p и U_d). Анодный ток в пассивной зоне превышает величину тока в активной зоне по экспоненциальной зависимости с показателем степени от 3 до 6. Значение показателя степени зависит от вида металла и типа корродирующей среды.

В результате достигается надежная защита металла, но при этом потенциал не должен превышать величины U_d, так как в этом случае будет образовываться свободный кислород, способствующий окислению металла.

Антикоррозионные покрытия

Антикоррозионные покрытия формируются в виде защитной пленки, наносимой непосредственно на металлическую поверхность, подверженную коррозионному воздействию агрессивной среды. Защитное покрытие не должно быть пористым и электропроводным и должно иметь достаточную толщину.

Ингибиторы коррозии

Ингибиторы – вещества, добавляемые в малых концентрациях в коррозионную среду (максимум – несколько сотен миллионных долей) для абсорбции на поверхности защищаемого металла. Ингибиторы позволяют резко ослабить процесс коррозии путем блокирования анодного или катодного подпроцессов (часто оба эти подпроцесса блокируются одновременно). Роль таких ингибиторов чаще всего выполняют амины и амиды органических кислот. В автомобилестроении ингибиторы используются в качестве присадок к топливу, а также добавляются в охлаждающую жидкость для предотвращения коррозионного разрушения системы охлаждения двигателя.

Ингибиторы коррозии с испаряющейся фазой обеспечивают временную защиту металлических изделий при их хранении или транспортировке. Эти ингибиторы должны быть просты в применении и при этом легко удаляться. Недостатком является их потенциальная опасность для здоровья человека.

Испаряющиеся ингибиторы коррозии (VPI) и летучие ингибиторы коррозии (VCI) представляют собой органические соединения. Обычно их помещают в специальную упаковку или в виде растворимых жидких эмульсий в систему смазки. С течением времени такие ингибиторы коррозии испаряются и адсорбируют на металлических поверхностях в виде мономолекул. Таким образом, они замедляют протекание анодного и катодного подпроцессов коррозии (типовой пример – нитрит дициклогексиламина).

Для повышения эффективности ингибиторы коррозии применяют в виде уплотненного покрытия, заполняющего как можно большую площадь поверхности деталей и узлов. Ингибиторы коррозии этого типа применяются в виде уплотнений из специальной бумаги или полиэтиленовой фольги. Уплотнения могут вскрываться для осмотра и проверки содержания ингибитора коррозии. Продолжительность действия содержащегося в уплотнениях ингибитора коррозии зависит от степени затяжки уплотнительного узла и температуры (приблизительный срок службы обычно составляет два года; при температуре, превышающей комнатную, срок службы уменьшается).

Состоят из нескольких компонентов, обеспечивающих одновременную защиту разных металлов и их сплавов (исключение – кадмий, свинец, вольфрам, магний).

Осаждения и покрытия

Осаждения и покрытия используются, чтобы приспособить поверхностные свойства компонентов к особым требованиям («обработка поверхности»). Таким образом, возможно, например, сделать так, чтобы компонент, выполненный из вязкого дешевого материала, получил твердую износостойкую поверхность. Основными задачами использования покрытий являются:

- защита от коррозии (а также обеспечение функциональности и сохранение декоративных свойств);
- защита от изнашивания;
- изготовление электрических контактов (съемные, сварные, паяные, склеиваемые и спрессованные контакты).

В технологиях покрытий сделаны различия между следующими типами покрытий:
осаждения, которые представляют собой осаждаемый слой материала;

- конверсионные покрытия, в которых функциональное покрытие получается в результате химической или электрохимической реакции основного материала;
- диффузионные покрытия, в которых функциональное покрытие произведено распространением атомов или ионов в основной материал

Осаждение

Гальванопокрытие

Гальванопокрытие наносится с помощью внешнего источника питания. Заготовки погружаются в электролит (рис. 1), содержащий ионы металла, которые должны осаждаться. Ионы металлов предоставляются анодом либо образуются в электролите (когда используются инертные аноды).

Распределение линий электрического поля влияют на толщину осаждаемого слоя. Равномерная толщина слоя может быть достигнута за счет оптимизированной конфигурации анодов и экранов.

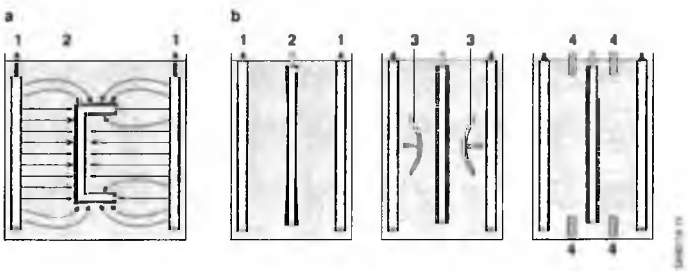
Гальванопокрытие широко используется в области защиты от коррозии, от износа и для изготовления электрических контактов. Некоторые важные технологии осаждения описаны ниже.

Цинк и цинковые сплавы

Электролитически осаждаемые цинковые покрытия широко используются в качестве антикоррозионной защиты покрытий для стальных компонентов и катодно эффективных средств защиты от коррозии (защитный эффект). Для повышения эффекта коррозионной защиты, цинк пассивируется в растворе свободного хрома (VI) в качестве замены ранее применяемой обычной хроматизации.

Цинковые сплавы, таких как цинк-никель с содержанием приблизительно 15 % Ni, обеспечивают значительно более высокую степень защиты от коррозии.

Рис. 1. Гальванопокрытие:
а – распределение электрического поля между анодом и катодом, вызывающее неравномерное образование толщины осаждения; б – сравнение значений толщины осаждения при гальванопокрытии без дополнительного реагента, с дополнительными анодами и экранами (схематическое изображение); 1 – анод; 2 – катод; 3 – дополнительный анод; 4 – экран



Никель

Никелевые гальванопокрытия создают компоненту локальную защиту от коррозии, придавая с приданием привлекательного внешнего вида. В автомобильной технике это покрытие, главным образом, применяется в свечах зажигания.

Хром

В случае гальванопокрытия хромом, делается различие между твердым и блестящим покрытием. Блестящее покрытие хрома используется в качестве осаждения толщиной приблизительно 0,3 мкм с никелевым или медноникелевым промежуточным осаждением. В недавнем прошлом бамперы и другие детали автомобилей имели блестящее покрытие их хрома из декоративных соображений. Осаждения Cu/Ni/Cr, переставшие широко применяться на автомобилях, теперь все более используются в премиальном сегменте.

Твердо-хромовые осаждения имеют толщину > 2 мкм. Вследствие высокого уровня твердости полученного электролитическим способом хромового покрытия, оно идеально подходит для использования в качестве покрытия для защиты от изнашивания. В прошлом твердо-хромовые покрытия часто наносились большой толщиной и затем механически обрабатывались. Дальнейшее развитие технологии привело к тому, что сегодня на компоненты, в основном, наносятся покрытия толщиной в пределах от 5 до 10 мкм и затем используются без дополнительной обработки (например, в деталях топливных форсунок).

Олово

Электролитическим способом осаждаемые оловянные покрытия, главным образом, используются в качестве обработки поверхностей контактов для штекерных соединений и контактов переключателей, а также для нанесения на контакты припоя. Толщина покрытия 2–3 мкм идеальна для контактов штекерных соединений. Большие таких покрытия требуются для нанесения припоя, чтобы гарантировать пригодность к пайке даже после длительных периодов хранения.

Золото

Золотые осаждения обычно используются для контактов, отвечающих строгим требованиям. Они характеризуются хорошей проводимостью, низким сопротивлением контактов и хорошим сопротивлением загрязнению и коррозии. Это гарантирует стабильность контакта. Твердо-золотые покрытия (с легирующим элементом, в основном, кобальтом, составляющим приблизительно 0,5 %), являющиеся более твердыми и более стойкими к трению, чем чисто-золотые покрытия, подходят для контактов, подвергающихся механическим нагрузкам.

Химическое осаждение (без электрического тока внешней цепи)

В отличие от гальванопокрытия, химическое осаждение характеризуются более однородным распределением толщины покрытия по поверхности компонента, так как на процесс осаждения не влияет внешнее электрическое поле. Вследствие медленной скорости

Таблица 1. Области применения покрытий

Технология нанесения	Материал покрытия	Основное применение
Гальванопокрытие	Zn, ZnNi	Защита от коррозии
	Cr	Защита от износа
	Sn, Ag, Au	Электрические контакты
Химическое осаждение	NiP, диспергирование NiP	Защита от износа и коррозии
	Cu, Sn, Pd, Au	Применение в электронике
Осаждение погружением в горячий раствор	Zn, Al	Защита от коррозии
	Sn	Электрические контакты
Окрашивание (горячее и с применением порошковых материалов)	Органические полимеры	Защита от коррозии (декоративные функции)
	Пигменты (красящие частицы)	Уменьшение износа, электрическая изоляция
Покрытия PVD/CVD (плазменная технология)	TiN, TiCN, TiAlN	Защита от износа инструментов
		Уменьшение трения и износа компонентов

осаждения и дорогостоящих химикатов, эти покрытия более дороги, чем те, что наносятся на металл гальваническим способом. Химическое осаждение стало широко использоваться в промышленности:

- «химический никель» (никель/фосфор) для защиты от коррозии и изнашивания;
- «химическая медь» и «химическое олово», применяемые в технологии печатных процессов.

Осаждение погружением в горячий раствор

Осаждение погружением в горячий раствор происходит во флоат-ванне. Погружение в горячий раствор катодным образом используются для того, чтобы защитить от коррозии низколегированные стали Используются цинк, сплавы цинка/алюминия и алюминий. Широко используемой практикой является недорогое покрытие листовых и полосных материалов. Однако следует обращать внимание на обработку кромок таких материалов.

Олово и покрытия из оловянного сплава, осаждаемые погружением в горячий раствор, прежде всего используются в качестве покрытия поверхностей для штепсельных соединений и поверхностей, предназначенных для пайки.

Цинк-ламельное осаждение

Цинк-ламельное осаждение – покрытие, основанное на использовании цинка, алюминиевых ламелей и неорганического связующего вещества. Покрытие получают иммерсионным центрифугированием или электростатическим распылением и термической закалкой. Цинк-ламельное осаждение – дешевое противокоррозионное покрытие для выпускаемых серийно стальных деталей (например, винтов и болтов).

Краски

У красок имеется широкий диапазон применения из-за широких вариантов химического состава и многочисленных способов образования покрытия, таких как нанесение кистью, распыление, и погружение, в том числе с использованием электрического тока (CD, катодное осаждение).

Покрытия, получаемые окрашиванием, могут выполнять множество различных функций. В автомобилях это, прежде всего, защита от коррозии, сопровождаемая декоративным эффектом, защита от изнашивания, звуко- или электроизоляция.

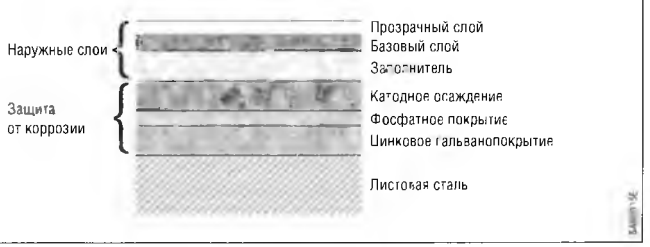
Кузов легкового автомобиля защищен сложной слоистой структурой (рис. 2). Узлы в моторном отделении, с другой стороны, обычно покрываются в один или два слоя краски при меньшем внимании к декоративным свойствам.

Низкорастворимые системы, прежде всего, краски на водной основе, почти всегда используются при создании автомобилей. Краски, основанные на порошковых материалах, и ультрафиолетовые краски являются полностью нерастворимыми.

Покрытия PVD и CVD

Покрытия PVD и CVD осаждаются, в основном, в вакууме, с использованием плазмы или термообработки автомобильных компонентов и инструментов (рис. 3). Есть два различных способа, в зависимости формирующего покрытие материала – твердого (PVD, физическое парофазное осаждение) или газообразного (CVD, химическое парофазное осаждение). В современных технологиях комбинируются обе эти категории вступающих в «реакцию» процессов.

Рис. 2. Слоистое строение покрытия кузова автомобиля



Покрытия из твердого материала

Инструменты покрывают твердыми материалами для увеличения их срока службы и улучшения свойств. Типичным примером покрытий инструмента, широко представленных на рынке, является нитрид титана цвета золота (TiN), который наносится, например, катодным напылением или термовакуумным испарением титана в реакции с азотом. Более свежие материалы покрытия, такие как карбонитрид титана (TiCN) или нитрид титана-алюминия (TiAlN), можно использовать для сторостной механической обработки.

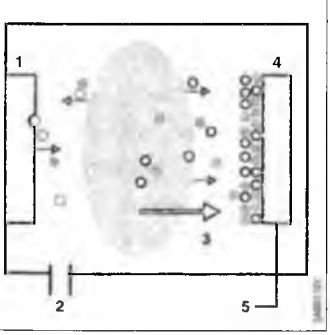
Супертвердые материалы, такие как алмаз, все более и более используются в качестве покрытия карбидных инструментов.

Покрытие DLC

Защита компонентов против изнашивания подчиняется специальным условиям. В данном случае покрытие должно установить низкий коэффициент трения для компонентов, которые входят в контакт друг с другом, и минимизировать изнашивание. Покрытие DLC (алмазоподобный углерод) не только защищает компонент, на поверхность которого оно нанесено, против изнашивания, но также и не имеющий покрытия компонент, составляющий пару трения. У покрытия имеется очень низкий коэффициент сухого трения — от 0,1 до 0,2, при трении по стали. Слои DLC обладают противокоррозийным эффектом. Из-за этих преимуществ покрытия DLC стали самыми важными в области технологий изготовления компонентов с покрытием. Однако, нужно отметить, что покрытия, содержащие водород, теряют свои свойства при окислении в атмосфере в условиях локальной температуры 350 °C и выше. Твердо-материальные покрытия, такие как TiN, могут противостоять значительно более высоким температурам и также используются в качестве одной из составляющих покрытия.

Рис. 3. Схематичное нанесение ионно-плазменного покрытия PVD/CVD в вакуумной камере:
1 – неуравновешенный магнетронный катод, 2 – вход газа; 3 – интенсивная ионная бомбардировка; 4 – подложка; 5 – электрическое напряжение

○ *– аргон;*
✲ *– металл/углерод;*
● *– азот/водород*



Различные составы покрытий и применяемые процессы позволяют материалам быть приспособленными к различным нагрузкам, вызывающим изнашивание, или комплексу воздействий в виде абразива, вибрации, скольжения, схватывания и адгезионного изнашивания. Поскольку нет никакой стандартизации для покрытий DLC, необходимо тщательно проверять свойства алмазоподобного углеродного покрытия с помощью различных тестов. Покрытия PVD и CVD наносятся при условии, что температура компонента во время этого процесса не превысит 250 °C. Это позволит избежать снижения твердости основного стального материала.

Углеродные покрытия низкого трения, содержащие металлический карбид i-C (WC), являются электрически проводящими и имеют микротвердость по Виккерсу приблизительно 1800 HV при модуле упругости 150– 200 ГПа.

Неметаллические углеродные покрытия (a-C:H) имеют увеличенную твердость по Виккерсу приблизительно до 3500 HV и значительно улучшенную износостойкость, но это сопровождается увеличением хрупкости. Они являются электрическими изоляторами.

С толщиной слоя от 2 до 4 мкм алмазоподобные углеродные покрытия обеспечивают очень хорошую защиту от изнашивания и являются особенно подходящими для компонентов, изготовленных с высокой точностью, которые подвергаются высоким механическим нагрузкам. После нанесения покрытия эти компоненты не идут на переработку. В топливных насосах высокого давления для дизеля и двигателях с искровым

зажиганием, оборудованных электронной системой впрыска, поршень ходит в цилиндре с зазором всего в несколько микрометров. В этом случае покрытия DLC, нанесенные на поверхность поршня, гарантируют надежную его работу на весь срок службы.

Диффузионные покрытия

Поверхностную антикоррозионную обработку металлических изделий выборочно можно объединить с поверхностным их упрочнением с использованием диффузионных процессов для термохимического цементирования, цианирования и хромирования, или термическим упрочнением бором или ванадием. Металлические изделия могут также подвергаться антикоррозионной обработке окислением, азотированием, сульфатированием и без поверхностного упрочнения.

Конверсионные покрытия

Конверсионные покрытия образуются не путем нанесения материала, но путем химического или электрохимического преобразования исходного материала.

Покрытия, получаемые воронением
Покрытия, получаемые в процессе воронения, состоят из тонких железооксидных слоев (преимущественно – Fe_3O_4), которые образуются в результате окисления стали в щелочном водном растворе, содержащем нитрит, при температуре > 100 °C. С последующим смазыванием они обеспечивают надежную защиту от коррозии.

Покрытия, получаемые фосфатированием
Покрытия, получаемые при фосфатировании, образуются на стали, оцинкованной стали, а также на алюминии в растворах, содержащих фосфорную кислоту, путем погружения или распыления. Покрытия из фосфата цинка преимущественно используются в качестве грунта для лакокрасочных покрытий. Фосфат марганца служит противоизносным покрытием с защитой против схватывания, и как грунт под другие покрытия для улучшения антифрикционных свойств компонента.

Покрытия, получаемые анодированием
Анодированные покрытия формируются за счет электрохимического преобразования металла в оксиды металлов в водных электролитах. Могут быть анодированы алюминий, магний, титан. Анодированные покрытия на алюминиевых материалах широко используются для защиты от износа и коррозии.

Смазочные материалы

Термины и определения

Смазочные материалы
Смазочные материалы обеспечивают разделение поверхностей перемещающихся друг относительно друга деталей, уменьшают силу трения и износ деталей, способствуют охлаждению, герметизации взаимодействующих деталей, замедлению коррозии и снижению уровня шума. Смазочные материалы могут быть в твердом, пластичном, жидком или газообразном состоянии.

Присадки
Для улучшения технических характеристик смазочных материалов в них добавляют различные присадки, изменяющие их физические (вязкость, реологию) и химические (замедление окисления и коррозии) свойства. Присадки масел также изменяют свойства трущихся пар, например, уменьшают коэффициент трения, предохраняют поверхности трения от изнашивания, защищают их от заедания и задиров. При выборе присадок необходимо уделять особое внимание их совместимости между собой и с базовой основой смазочного материала.

ATF
Рабочие жидкости для автоматических трансмиссий (ATF) – специальные масла, отвечающие жестким техническим требованиям, предъявляемым к смазочным материалам для автоматических трансмиссий.

Зола
Зола – минеральный продукт, образующийся в результате окисления и сульфатации при сжигании горючих материалов (DIN 51575, DIN 51803).

Расслоение смазки (синерезис)
Синерезис – отделение масляной основы от загустителя в пластичных смазках (сепарация нефти, DIN 51817).

Бингамовские тела
Бингамовские тела – жидкие материалы, реологические характеристики которых отличаются от ньютоновских жидкостей.

Точка воспламенения
Температура (при давлении 0,1 МПа), при которой пары смазки, образующие смесь с воздухом, загораются и горят не менее 5 с (DIN ISO 2592).

Температура помутнения
Температура, при которой минеральное масло теряет прозрачность вследствие образования кристаллов парафина или осаждения других твердых частиц (DIN ISO 3015).

Детергенты (моющие присадки)
Эти присадки предотвращают масляные или углеродистые отложения на горячих компонентах (например, поршнях).

Дисперсанты
Дисперсанты предотвращают (рассеивают) образование осадков или седиментацию (осаждение), особенно при низких температурах.

EP-смазки
Смазки для экстремальных давлениий (EP) – см. «смазочные материалы, работающие в условиях высоких давлений».

Давление истечения
В соответствии с определением Кестерниха, давление, необходимое для продавливания пластичной смазки сквозь калиброванное отверстие (DIN 51805).

Предел текучести
Предел текучести – минимальное напряжение сдвига, при котором вещество начинает течь. Выше предела текучести реологические свойства пластических веществ – такие же, как у жидкостей (DIN 13342).

Модификаторы трения
Модификаторы трения – присадки смазочных материалов, уменьшающие коэффициент трения, повышающие несущую способность деталей машин после насыщения этими присадками трущихся поверхностей, препятствующие заеданию взаимодействующих деталей.

Геливые смазки
Геливые смазки – студенистые массы, содержащие неорганические вещества (например, бентониты, силикагели).

Антифрикционное покрытие
Антифрикционное покрытие (AFC) – твердый смазочный материал, в составе которого

имеются связующие вещества, удерживающие его на поверхности трения.

Графит
Графит – твердая смазка со слоисто-решетчатой структурой, обеспечивающая смазку соприкасающихся деталей при высокой влажности атмосферы или в среде диоксида углерода, а также при трении в вакууме.

Предельная температура прокачивания
Предельная (граничная) температура прокачивания – предел прокачивания масла в двигателе после холодного пуска. Достаточная подача смазки не может быть гарантирована ниже предельной температуры прокачивания.

Смазочные материалы для высоких давлений
Смазочные материалы, работающие в условиях высоких давлений, содержат присадки, повышающие несущую способность, уменьшающие износ и предотвращающие задир в условиях высоких контактных нагрузок (особенно эффективны при трении сталь по стали).

Гидрокрекинговые масла
Гидрокрекинговые масла – рафинированные минеральные масла с повышенным индексом вязкости (VI – от 130 до 140).

Сохраняемость
Сохраняемость – период времени до появления существенных изменений свойств смазочного материала (например, старения вследствие окисления).

Ингибиторы
Ингибиторы – активные ингредиенты защиты системы смазки, которые замедляют химическое разложение смазочных материалов (например, из-за окисления) или защищают от коррозии (ингибиторы коррозии).

Низкотемпературные отложения
Низкотемпературные отложения (холодный шлам) – продукты разложения, накапливающиеся в картере двигателя вследствие окисления и конденсации масла при малых нагрузках. Увеличивают износ и могут привести к выходу из строя двигателя

Надежность холодного пуска
Температура надежности холодного пуска находится приблизительно на 5 °С выше предельной температуры прокачивания.

Консистентность
Консистентность определяется легкостью, с которой могут деформироваться смазочные материалы (DIN ISO 2137). Стандартный конус погружается в пластичную смазку и замеряется глубина пенетрации в 1/10 мм (рис. 1, см. также определение «пенетрация» и табл. 5).

Смазочный материал с композицией присадок
Смазочный материал, содержащий присадки, улучшающие его свойства (например, снижающие износ, защищающие от коррозии, улучшающие вязкостно-температурные характеристики, стабилизирующие старение).

Долговечные моторные масла
Долговечные моторные масла – масла с существенно расширенными интервалами замены.

Универсальные масла
Универсальные масла – масла для двигателей и трансмиссий, обладающие хорошим сопротивлением к изменению вязкостно-температурных характеристик и предназначенные для круглогодичного использования.

Мыльные смазки
Мыльные смазки приготавливаются на основе мыльных загустителей, состоящих из синтетических или технических жирных кислот.

Минеральные масла
Минеральные масла являются продуктом перегонки или очистки нефти или каменного угля. Состоят из углеводородов в виде разнообразных химических соединений. Подразделяются на: парафиновые масла (в виде цепочек насыщенных углеводородов); нафтеновые масла (в виде замкнутых цепей насыщенных углеводородов, содержащих, в основном, пять или шесть атомов углерода в цепи); ароматические масла (например, алкилбензол).

Дисульфид молибдена
Дисульфид молибдена (MoS_2) – твердая смазка со слоисто-решетчатой структурой, уменьшающая трение между взаимодействующими металлическими деталями. В сочетании со связующим веществом образует на поверхности трения устойчивое лакообразное соединение.

Пенетрация
Пенетрация означает глубину погружения стандартного конуса (в 10^{-1} мм) в пластичную смазку за определенный период времени и при определенной температуре (рис. 1). Чем мягче смазка, тем выше число пенетрации (DIN ISO 2137).

Полярные вещества
Диполи, адсорбирующиеся на металлической поверхности. Эта категория веществ включает простые и сложные эфиры, полигликоли и жирные кислоты.

Точка застывания
Точка застывания – температура, при которой предварительно нагретый и охлажденный с заданной скоростью смазочный материал продолжает течь (DIN ISO 3016).

PTFE
PTFE (политетрафторэтилен, тефлон) является термопластичной твердой смазкой с выдающимися характеристиками, особенно при очень низких скоростях скольжения (< 0,1 м/с). PTFE, однако, становится хрупким при температурах примерно 270 °C. Верхняя рабочая температура для использования составляет около 260 °C. Выше этого уровня, он разлагается на токсичные вещества.

Реология
Реология описывает закономерности пластической деформации и текучести материалов. В основном, описывается кривыми течения материалов (рис. 2). На диаграмме строится зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига γ.

Напряжение сдвига $\tau = F/A$ (в Н/м^2 = Па),
где F – сила; A – площадь поперечного сечения.

Скорость сдвига $\gamma = v/y$ (в с$^{-1}$),
где v – скорость скольжения; y – толщина масляной пленки.

Напряжение сдвига τ можно определить, используя модель с двумя пластинами. Исследуемая жидкость помещается между этими пластинами. Нижняя пластина фиксируется, верхняя движется со сдвигом под действием силы сдвига F (рис. 3).

Вязкость сдвига
В идеальных жидкостях при постоянной температуре вязкость сдвига η определяется отношением напряжения сдвига τ к скорости сдвига γ:

$$\eta = \tau/\gamma .$$

Также для η используется понятие «динамическая вязкость». Единица измерения вязкости сдвига – сантипуаз (сП), равен 1 мПа·с.

Рис. 1. Определение пенетрации:
1 – стандартный конус; 2 – пластичная смазка при определенной температуре; x – глубина пенетрации

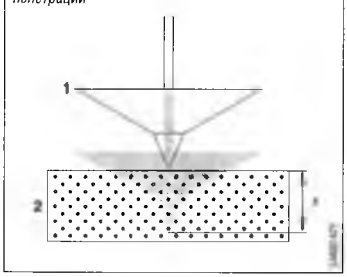
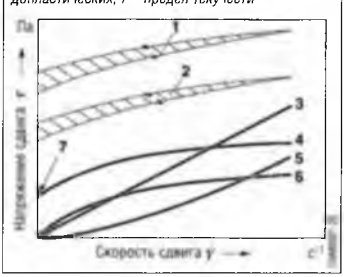


Рис. 2. Кривые течения материалов:
1 – реопексных; 2 – тиксотропных, 3 – ньютоновских; 4 – пластичных; 5 – дилатантных; 6 – псевдопластических; 7 – предел текучести



Кинематическая вязкость
Кинематическая вязкость ν измеряется капиллярным или шариковым вискозиметром. Если известна плотность ρ, кинематическую вязкость можно рассчитать через вязкость сдвига η:

$\nu = \eta/\rho$, (ν в мм^2/с; ρ в кг/м^3).

Единица измерения кинематической вязкости – сантистокс (сСт), равен 1 мм^2/с.

Ньютоновские жидкости
Ньютоновские жидкости характеризуются линейной зависимостью между τ и γ, которую можно изобразить в виде прямой, проходящей через ноль, угол наклона которой увеличивается пропорционально возрастанию вязкости.

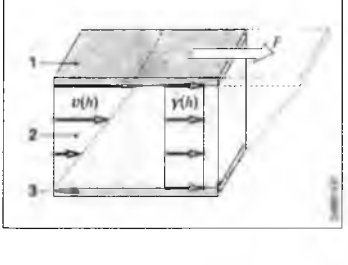
Все материалы, не отвечающие такой зависимости, классифицируются как неньютоновские жидкости.

Вязкое течение
При вязком течении с увеличением скорости сдвига происходит снижение вязкости (например, жидкие смазки, универсальные масла).

Дилатантное течение
При дилатантном течении с увеличением скорости сдвига происходит увеличение вязкости.

Пластичное течение
Пластичное течение характеризуется внутренней вязкостью, присущей жидкости наряду с пластической деформацией (например, пластичные смазки).

Рис. 3. Распределение скорости течения и скорости сдвига в слое жидкости:
1 – сдвигаемая пластина, 2 – жидкость; 3 – зафиксированная пластина; F – сила сдвига, h – толщина слоя жидкости; υ – скорость; γ – скорость сдвига



Тиксотропные материалы
У тиксотропных материалов уменьшение вязкости происходит пропорционально времени сдвига, и возвращение к первоначальной вязкости протекает постепенно, по окончании действия сдвигающих усилий.

Реопексные материалы
У реопексных материалов увеличение вязкости происходит пропорционально времени сдвига, и возвращение к первоначальной вязкости наступает постепенно, по окончании действия сдвигающих усилий.

Точка каплепадения
Точка каплепадения – минимальная температура, при которой происходит падение первой капли пластичной смазки, нагреваемой в определенных условиях (DIN ISO 2176).

Кривая Штрибека
Кривая Штрибека устанавливает зависимость коэффициента трения в зоне контакта двух смазанных поверхностей соприкасающихся деталей (например, смазанных подшипников скольжения или качения) от скорости скольжения (рис. 4). С увеличением скорости скольжения растет гидродинамическое давление в смазываемом контакте трения.

Сухое трение
При сухом трении толщина смазочной пленки меньше величины шероховатостей поверхности трущихся деталей.

Смешанное трение
При смешанном трении толщина смазочной пленки приблизительно соизмерима с величиной шероховатости поверхности трущихся деталей.

Гидродинамическое трение
Гидродинамическое трение характеризуется полным разделением трущихся поверхностей (теоретически – безизносный режим трения).

Синтетическое масло
Синтетическое масло, изготавливаемое в процессе химического синтеза, состоит из небольших молекул. Например, из синтетических углеводородов в форме полиальфаолефинов, которые изготавливаются

полимеризацией и последующей гидратации этилена. Другие синтетические масла – полигликоли, сложноэфирные масла, силиконовые масла и перфторполиэфирные масла.

Вязкость

Вязкость определяет внутреннее трение в жидкости (DIN 1342, DIN EN ISO 3104). Вязкость характеризуется степенью сопротивления молекул жидкости воздействию сил смещения (см. определение «реология»).

Индекс вязкости

Индекс вязкости (VI) – показатель вязкости, с помощью которого оценивается интенсивность влияния температуры на вязкость масла. Чем больше индекс вязкости, тем меньшее влияние оказывает температура на вязкость масла (DIN ISO 2909).

Классификация вязкости масел

Смазочные масла классифицируются по специальным классам вязкости:

- классы вязкости по ISO (DIN 51519), см. табл. 1;
- классы вязкости по SAE (SAE J 300, SAE J 306), см. табл. 2 и 3.

Производственная пенетрация

Производственная пенетрация – пенетрация образца пластичной смазки после его обработки на смесителе смазок (DIN ISO 2137).

Таблица 1. Классификация вязкости масел по ISO 3448 (DIN 51 519)

Класс вязкости по ISO	Кинематическая вязкость при температуре 40 °C, мм²/с	Допускаемый диапазон кинематической вязкости при температуре 40 °C, мм²/с	
		min.	max.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

Рис. 4. Кривая Штрибека:
R – шероховатость поверхности; F_N – нормальная сила; d – зазор между трущимися деталями; диапазон a – сухое трение, повышенный износ; диапазон b – смешанное трение, средний износ; диапазон c – гидродинамическое трение, износ отсутствует

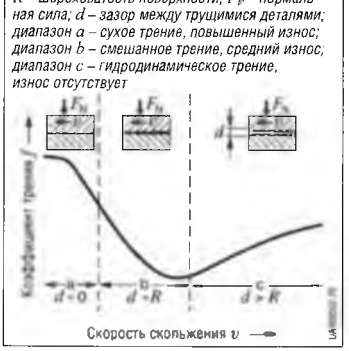


Таблица 2. Классификация вязкости трансмиссионных масел по SAE (SAE-J306, июнь 2005 г.)

Класс вязкости по SAE	Наибольшая температура для динамической вязкости 150 000 мПа с, °C (ASTM D 2983)	Кинематическая вязкость при температуре 100 °C, мм²/с (ASTM D 445)	
		min	max.
70 W	–55	4,1	–
75 W	–40	4,1	–
80 W	–26	7,0	–
85 W	–12	11,0	–
90	–	13,5	24,0
140	–	24,0	32,5
250	–	41,0	–

Моторные масла

Моторные масла применяются для смазки трущихся деталей двигателей внутреннего сгорания. Большинство моторных масел имеет минеральную основу, оснащенную присадками. Повышенные требования к условиям работы высоконагруженного контакта трения и увеличению сроков замены масел привели к распространению полностью или наполовину синтетических масел (например, полученных методом гидрокрекинга). Качество моторных масел определяется составом присадок.

Присадки, в соответствии с их функциями, подразделяются на:
- повышающие индекс вязкости (VI);
- снижающие температуру застывания;
- замедляющие окисление и коррозию;
- моющие;
- обеспечивающие смазочную способность при высоких контактных напряжениях (EP);
- модификаторы трения;
- противопенные.

Моторные масла рассчитаны на работу в условиях тепловых и механических нагрузок, действующих в двигателях внутреннего сгорания.

Существует несколько классификаций моторных масел:
- ACEA (Ассоциация европейских производителей автомобилей) или CCMC (Комитет автомобильных производителей Общего Рынка, функционировавший до 1990 г., но стандарты которого еще действуют – в 1996 г. они заменили стандарты ACEA);
- API (Американский нефтяной институт);
- MIL (военный стандарт); за исключением раздела MIL-L-2104 F для сверхтяжелых автомобилей и грузовиков, стандарт MIL не соответствует критериям европейского сектора гражданского автомобильного транспорта;

Таблица 3. Классификация вязкости моторных/трансмиссионных масел (SAE J300, май 2004 г.)

Класс вязкости по SAE	Динамическая вязкость (ASTM D 5293), мПа·с при °C	Предельная динамическая вязкость, при которой прокачивается масло (ASTM D 4684), мПа с при °C	Кинематическая вязкость при температуре 100 °C (ASTM D 445), мм²/с		Динамическая вязкость[1] при температуре 150 °C и высокой скорости сдвига 106 c^{-1} (ASTM D 4683, CEC L 36 A 90, ASTM D 4741 или ASTM D 5481), мПа с
	max.	max.	min	max.	min.
0 W	6200 при –35 °C	60 000 при –40 °C	3,8	–	–
5 W	6600 при –30 °C	60 000 при –35 °C	3,8	–	–
10 W	7000 при –25 °C	60 000 при –30 °C	4,1	–	–
15 W	7000 при –20 °C	60 000 при –25 °C	5,6	–	–
20 W	9500 при –15 °C	60 000 при –20 °C	5,6	–	–
25 W	13 000 при –10 °C	60 000 при –15 °C	9,3	–	–
20	–	– 5,6	< 9,3	2,6	
30	–	–	9,3	< 12,5	2,9
40	–	–	12,5	< 16,3	2,9 (0W– 40, 5W– 40, 10W– 40)
40	–	–	12,5	< 16,3	3,7 (15W– 40, 20W– 40, 25W– 40, 40)
50	–	–	16,3	< 21,9	3,7
60	–	–	21,9	< 26,1	3,7

[1] Также имеет название HTHS (высокотемпературный высокий сдвиг) вязкость

– классификации автомобильных производителей (например, ILSAC).

К основным критериям оценки моторных масел относятся:
– содержание сульфатно-зольной и цинковой составляющих;
– тип двигателя (дизельный или с искровым зажиганием, атмосферный или наддувный);
– уровень нагружения элементов силовой трансмиссии и подшипниковых узлов;
– противоизносные свойства;
– рабочая температура масла (в картере двигателя);
– влияние на масло химически активных продуктов сгорания топлива;
– моющие свойства;
– совместимость с уплотнительными материалами.

Классификация ACEA (CCMC)

Моторные масла для бензиновых двигателей
– A1: специальные масла с высокой смазывающей способностью с пониженной вязкостью при высоких температурах и высоким сопротивлением сдвигу.
– A2: стандартные моторные масла с высокой смазывающей способностью без любых ограничений по вязкости; обладают более высокими качествами, чем масла классов CCMC G4 и API SH; устаревшие.
– A3: масла этого класса обладают более высокими качествами по сравнению с маслами классов A2, CCMC G4 и G5.
– A5: обладают улучшенными показателями «экономии топлива» по сравнению с маслами класса A3, что вызвано меньшей вязкостью, включая улучшенный состав добавок. Только для использования на двигателях, которые специально разработаны для этой цели.

Моторные масла для дизельных двигателей легковых автомобилей
– B1: масла этого класса соответствуют классу A1 по показателю низких потерь на трение, что обеспечивает пониженный расход топлива.
– B2: стандартные масла с высокой смазывающей способностью, соответствующие существующим минимальным требованиям к качеству моторных масел (качество масел этого класса выше, чем у масел класса CCMC PD2); устаревшие.
– B3: качественные характеристики у масел этого класса лучше, чем у масел класса B2.
– B4: масла этого класса соответствуют классу B2, преимущественно используются на двигателях VW TDI.
– B5: данные масла превосходят масла классов B3 и B4, имеют улучшенные показатели «экономии топлива», также удовлетворяют требованиям VW 50 600 и 50 601. Внимание: Только для применения на двигателях, которые специально разработаны для этой цели.

Моторные масла для дизельных двигателей легковых автомобилей, оборудованных сажевым фильтром
– C1: масла этого класса применяются с 2004 года, sulfate-ash content max. 0.5 %. Lowered HTHS (Ford).
– C2: применяются с 2004 года, содержание сульфатной золы — максимум 0,8 %. Вязкость HTHS составляет > 2,9 мПа·с (Peugeot).
– C3: применяются с 2004 года, содержание сульфатной золы – максимум 0,8 %. Вязкость HTHS составляет > 3,5 мПа·с (Daimler AG и BMW).

Моторные масла для дизельных двигателей коммерческих автомобилей
– E1: масла для двигателей без наддува и с турбонаддувом при нормальных интервалах между сменой масла; устаревшие.
– E2: масла этого класса соответствуют спецификации MB 228.1. Предназначены преимущественно для использования в двигателях, выпущенных до введения стандарта Евро-2.
– E3: масла этого класса предназначены для двигателей, соответствующих стандарту Евро-2, соответствуют спецификации MB 228.3. По сравнению с ранее выпускаемыми маслами класса CCMC D5, эти масла значительно улучшены по показателям снижения нагарообразования и уменьшения склонности к загущению; устаревшие.
– E4: масла этого класса предназначены для дизельных двигателей, соответствующих стандартам от Евро-1 до Евро-3, увеличивают интервалы времени между сменой масла (в соответствии со спецификациями производителей автомобилей). В большой мере базируются на спецификации MB 228.5.
– E5: масла этого класса предназначены для дизельных двигателей, соответствующих стандарту Евро-3, имеют уменьшенное содержание золы.
– E6: масла этого класса предназначены для двигателей, оборудованных рециркуляцией

отработавших газов (EGR) с/без сажевого фильтра и селективной каталитической нейтрализацией (SCR-NO_x, уменьшает содержание в отработавших газах NO_x). Рекомендованы для двигателей с дизельными сажевым фильтром и питанием топливом, не содержащим серы, содержание в масле сульфатной золы – менее 1% по массе.
- E7: масла этого класса предназначены для двигателей, оборудованных EGR и SCR-NO_x, содержание в масле сульфатной золы – максимум 2% по массе.

Примеры применения:
Согласно данной классификации, приведенные выше классы обычно дополняются. Например: A3/B3–04 – масло для двигателей с искровым зажиганием (класс A) и дизельных двигателей (класс B) категории качества 3, испытания соответствуют классификации ACEA, изданной в 2004 году.

Классификация API
- S (сервис): для двигателей с искровым зажиганием.
- C (коммерческие автомобили): для дизельных двигателей.
- SF: для двигателей выпуска с 1980 года; устаревшие.
- SG: применяются с 1988 года, с более жесткими требованиями к выбросам вредных веществ в атмосферу, улучшенной стабильностью к окислению и повышенными противоизносными свойствами.
- SH: применяются с середины 1993 года, соответствуют уровню качества SG, но с более жесткими требованиями к оценке масел.
- SJ: применяются с октября 1996 года, прошли более интенсивные испытания, чем масла класса SH.
- SL: применяются с 2001 года, меньший расход масла по сравнению с SJ, меньшая испаряемость, улучшенные чистящие свойства, намного лучшее сопротивление старению.
- SM: применяются с 2004 года, для двигателей с искровым зажиганием и легких дизельных двигателей, с повышенными противоизносными свойствами, улучшенной прокачиваемостью, включая отработавшие масла.
- CC: моторные масла для нетурбонаддувных дизельных двигателей; устаревшие.
- CD: моторные масла для нетурбонаддувных и турбонаддувных дизельных двигателей, заменили API CF в 1994 году.
- CD-2: отвечают требованиям API CD, дополнительно могут использоваться в двухтактных дизельных двигателях.
- CF-2: специально предназначены для применения в двухтактных двигателях (выпускаются с 1994 года).
- CE: с эксплуатационными характеристиками, аналогичными CD, применимы для двигателей Mack и Cummins.
- CF: заменившие масла класса API CD в 1994 году. Предназначены специально для двигателей с непосредственным впрыском топлива; применяются даже в случае, когда содержание серы в топливе превышает 0,5%.
- CF-4: в основном, соответствует свойствам масла API CE, но с более жесткими требованиями к оценке масел применительно к лабораторному одноцилиндровому дизельному двигателю фирмы Caterpillar с турбонаддувом.
- CG-4: предназначены для дизельных двигателей, работающих в очень напряженных условиях; по своим качествам масла этого класса лучше масел классов API CD и API CE; применяются при условии, что в топливе содержится менее 0,5% серы; предназначены для двигателей, выпущенных после вступления в действие в 1994 году норм предельно допустимой токсичности отработавших газов.
- CH4: масла для современных двигателей коммерческих автомобилей, применяются с 1998 года. Превосходят CG-4 по требованиям к износу, наличию сажи и вязкости. Имеют более длительные интервалы замены.
- CI-4: применяются с 2002 года, предназначены для высокоскоростных четырехтактных двигателей, оборудованных системой EGR, отвечающих перспективным нормам токсичности отработавших газов. Применимы при содержании серы более 0,5%.
- CI-4 plus: соответствуют CI-4, но с повышенными требованиями к удельному содержанию сажи и улучшенной текучестью.
- CJ-4: применяются с 2006 года. Для высокоскоростных автомобилей, которые должны отвечать нормам токсичности отработавших газов США 2007 года для дизельных двигателей (содержание серы – ниже 500 промилей). Применимы при использовании сажевого фильтра и каталетического нейтрализатора NOx.

ILSAC GF-3
Объединенный стандарт General Motors, Daimler AG, Ассоциации японских автомо-

бильных производителей и Ассоциации двигателестроителей США. В добавлении к API SL, стандарт отвечает требованиям испытаний топливной экономичности.

ILSAC GF-4
Классификация по API SM.

Градация вязкости по SAE
(SAE J300, SAE J306)
Градация вязкости по SAE (Общество автомобильных инженеров) соответствует международным стандартам определения вязкости масел, но не несет информации по качеству масел.

Различают моторные масла целевого назначения и универсальные. Универсальные масла в настоящее время получили широкое распространение. В табл. 2 и 3 приведены характеристики вязкости двух серий низкотемпературных масел. Для серии, обозначенной буквой «W» (зимнее), приводятся показатели наибольшей вязкости при запуске двигателя, наименьшей температуры прокачиваемости масла, а также наименьшей и наибольшей вязкостей при температуре 100°С.

Большее отношение к практике эксплуатации имеют спецификации вязкости при высокой температуре (150 °С) и высоком напряжении сдвига (вязкость HTHS, табл. 3). Это значение приобрела особое значение с введением масел с пониженной высокотемпературной вязкостью (ниже 3,5 МПа·с). Эти масла могут использоваться только с разрешения автопроизводителя.

Универсальные моторные масла
Характеризуются менее выраженной зависимостью вязкости от температуры (рис.5). Они обладают высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, могут использоваться круглогодично и обеспечивают быстрое смазывание всех узлов двигателя при его запуске в холодную погоду.

Универсальные масла с высокими смазывающими свойствами
Моторные масла, обладающие свойствами универсальности, малой вязкостью при низких температурах и содержащие антифрикционные присадки. Предельно низкое трение, обеспечиваемое этими маслами на всех эксплуатационных режимах, способствует уменьшению потребляемого двигателем топлива.

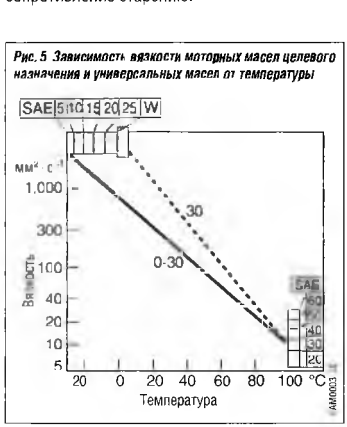
Трансмиссионные масла

Технические условия на трансмиссионные масла определяются типом трансмиссии и уровнем напряжений во всем диапазоне эксплуатационных режимов. Предъявляемые к этим смазочным материалам требования (стойкость к высоким режимам нагружения, высокая стабильность вязкости при изменении температуры, сопротивление старению, хорошие противопенные свойства, совместимость с материалами прокладок и уплотнений) могут быть выполнены лишь за счет специальных присадок. В отличие от моторных масел, трансмиссионные масла не содержат или имеют минимальное содержание моющих присадок, не обладают улучшенным индексом вязкости VI. Большинство из них работают на сдвиг и таким образом являются неактивными. Использование масел худшего качества может привести к повреждению подшипниковых узлов и зубчатых передач.

Вязкость трансмиссионных масел также должна удовлетворять специфическим условиям применения. Ее характеристики применительно к автомобильным трансмиссиям определены стандартом SAE J 306 (табл. 3).

Более широко начинают применяться синтетические трансмиссионные масла (например, полиальфаолефины), удовлетворяющие специальным требованиям. По сравнению со стандартными минеральными маслами, синтетические масла имеют лучшие вязкостно-температурные характеристики и повышенное сопротивление старению.

Рис. 5 Зависимость вязкости моторных масел целевого назначения и универсальных масел от температуры



Классификация трансмиссионных масел по API

- GL-1 – GL-3: в настоящее время не имеют практического применения.
- GL-4: для средних режимов нагружения гипоидных передач и трансмиссий, работающих в условиях экстремальных скоростей и ударных нагрузок, а также в режимах высоких скоростей вращения и малых крутящих моментов или низких скоростей вращения и больших крутящих моментов.
- GL-5: для высоконагруженных гипоидных передач легковых автомобилей, а также коммерческих, оснащенных трансмиссиями, работающими в режимах ударных нагрузок при высоких частотах вращения, а кроме того, в режимах малых крутящих моментов при высоких частотах вращения или больших крутящих моментов при низких частотах вращения.
- MT-1: для несинхронизированных механических коробок передач, применяемых на грузовых автомобилях производства США.

Масла для автоматических трансмиссий

Автоматические трансмиссии отличаются от механических, переключаемых вручную, способом передачи крутящего момента. Как принудительные механические, так и гидродинамические силовые передачи дополняются фрикционными сцепными устройствами. Фрикционные свойства рабочей жидкости (ATF) автоматической трансмиссии приобретают в таких устройствах особо важное значение.

Классификация General Motors:

- Замещающая классификация: Type A, Suffix A, DEXRON, DEXRON B, DEXRON II C, DEXRON II D.
- DEXRON II E: действовал до 1994 года.
- DEXRON III F/G: действует с 1994 по 1997 годы. Содержит более жесткие требования по стойкости к окислению и сохранению фрикционных свойств.
- DEXRON III H: действует с 2005 года, но устарел с 2007 года.
- DEXRON VI: действует с 2006 года.

Требования других производителей автомобилей (в том числе Ford, MB, MAN, Mack, Scania, ZF):
соответствуют спецификациям жидкостей для автоматических трансмиссий и спецификациям смазочных масел.

Смазочные масла

Смазочные масла составляют компоненты из базового масла и присадок. Присадки улучшают свойства базовых масел, например, повышают устойчивость к окислению, обеспечивают защиту от коррозии, задиров и заедания, улучшают вязкостно-температурные характеристики. Кроме того, свойства системы, такие как трение и износ, оптимизируются в требуемом направлении.

Существует широкий диапазон обозначений из букв и чисел (например, DIN 51502) для наиболее широкого описания применения масел.

Например, гидравлические жидкости:

- HL: гидравлическая жидкость на минеральной основе с присадками против коррозии и старения.
- HLP: соответствует HL, но с добавлением присадок против задира и заедания.
- HVLP: соответствует HLP, с добавлением присадки, повышающей индекс вязкости VI.

Рис. 6. Напряжение, действующее на смазочный материал, и результат этого воздействия



Пластичные смазки

Пластичные смазки представляют класс вязких смазочных материалов, основное преимущество которых по сравнению с маслами состоит в способности удерживаться на деталях без применения дополнительных конструктивных устройств. Применяются в подшипниках колес, генераторах, системах зажигания, электродвигателях очистных щеток лобового стекла, серводвигателях. В табл. 4 приведен состав пластичных смазок, состоящих из трех основных компонентов – базовой основы, загустителя и присадок.

Минеральные масла обычно используются в качестве основного компонента пластичных смазок, но в последнее время расширяется использование синтетических масел (в связи с ужесточением требований к сопротивлению старению, вязкостно-температурным характеристикам, применению в условиях низких температур).

Загустители используются в качестве связующего вещества для масляной основы; в основном применяются мыла (рис. 7). Загустители связывают масло в коллоидно-губчатую структуру посредством окклюзии и молекулярных сил сцепления Ван-дер-Ваальса. Содержание загустителей в пластичных смазках зависит от типа загустителя, с увеличением содержания которого повышается консистентность по системе NLGI (Национальный институт пластичных смазок, стандарт США, см. табл. 5).

Присадки к пластичным смазкам предназначены для улучшения физических характеристик и химических свойств смазок, например, сопротивления окислению, улучшения условий работы при высоких давлениях, снижения трения и износа.

Твердые добавки (например, MoS2) также применяются в пластичных смазках для повышения смазывающих свойств в узлах трения автомобилей.

Пластичные смазки выбираются в зависимости от их физических характеристик, эффективности смазывания трущихся поверхностей и совместимости с контактирующими со смазкой материалами. Полимеры вызывают взамопротивоположные эффекты, например:

- образование трещин под действием напряжений (рис. 8);
- изменения консистенции;
- разрушение полимеров;
- разбухание, усадку, хрупкость.

Так, например, смазки на минеральной и смазки на основе синтетических углеводородов не должны вступать в контакт с эластомерами, используемыми вместе с тормозной жидкостью (на полигликолевой основе) (в этом слу-

Таблица 5. Классификация пластичных смазок по консистентности (DIN 51 818)

Классы по системе NLGI	Глубина проникновения стандартного конуса в соответствии со стандартом DIN ISO 2137, в десятых долях мм
000	445–475
00	400–430
0	355–385
1	310–340
2	265–295
3	220–250
4	175–205
5	130–160
6	85–150 (пенетрация неперемешанной смазки)

Таблица 4. Состав пластичных смазок

Независимо от пары трения, большое количество компонентов смазки могут быть использованы для разработки высокоэффективных смазочных материалов

Base oils	Thickeners	Additives
Минеральные масла: парафиновая; нафтеновая; ароматическая	Мыла (Li, Na, Ca, Ba, Al) стандартные, гидроокисные; комплексные	для работы в условиях высоких давлений; для снижения износа; модификаторы трения (антифрикционные присадки); улучшающие адгезию; антиокислительные; антикоррозионные; твердые добавки (дисульфид молибдена, графит)
Синтетические масла: олефиновые полимеры; акриловые ароматики; сложные эфиры, спирты; простые эфиры, силиконы; фторированные углеводороды; фторированные	Органические загустители (свободные от мыл): поликарбамиды, PTFE (тефлон), PE (полиэтилен)	
	Неорганические загустители: бентонитовые соединения (оксиды алюминия), кремния (SiO_2)	

чае происходит, например, значительное разбухание этилен-пропиленового каучука).

Кроме того, пластичные смазки с различным составом не должны смешиваться (изменение физических свойств, разжижение смазки из-за уменьшения точки каплепадения). Термические и механические напряжения, в результате химических и/или физических изменений, могут иметь отрицательное влияние на функционирование всей трибологической системы (Рис. 6). Окисление, например, приводит к ацилированию, которое может вызвать коррозию металлических поверхностей, или растрескивание под напряжением некоторых пластмасс. В случае чрезмерной тепловой нагрузки, полимеризация может привести к отвердению смазки.

Каждое химическое изменение автоматически приводит к изменению физических свойств. Они включают реологические свойства, а также изменения вязкостно-температурных характеристик или точки каплепадения. Заметное снижение точки каплепадения может привести к растеканию смазки по поверхности трения, даже при умеренном подогреве.

Особенно важно помнить, что такие металлы, как железо или медь (или сплавы, содержащие медь, такие как бронза или латунь) катализируют окисление смазки, т. е. окисление происходит гораздо быстрей, чем без наличия катализатора в области контакта. Окисление быстро приводит к тому, что смазывающее действие смазки становится недостаточным. Часто структура мыла распадается, смазка становится жирной, оттекающей от поверхности трения или застывающей из-за полимеризации.

Посредством правильного подбора смазки и всей трибологической системы, с учетом нагрузки и условий взаимодействия, можно существенно увеличить потенциал производительности трущихся пар трения (например, механической передачи, подшипников скольжения и качения, исполнительных механизмов систем управления).

References

[1] Uwe J. Moller, Jamil Nassar: Schmierstoffe im Betrieb, Springer-Verlag, 2002.

[2] Thomas Mezger: Das Rheologie-Handbuch, 2nd Edition, Vincentz-Network, 2006.

[3] Wilfried J. Bartz: Schmierfette, Expert-Verlag, 2000.

Рис. 7. Фотография литиевого мыла, выполненная на растровом электронном микроскопе
Смазка сохраняется между скрученными фибриллами мыла

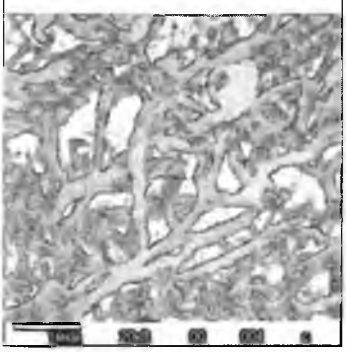
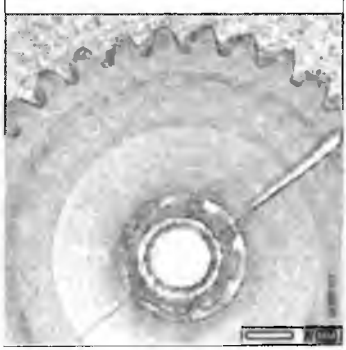


Рис. 8. Трещины напряжения на зубчатом колесе, изготовленном из полиоксиметилена (POM), вызваны полиальфаолефином (PAO)



Топливо

Бензин и дизельное топливо – продукты дистилляции сырой нефти. Они состоят из множества различных углеводородов. Температура кипения бензина находится в диапазоне от 30 до 210 °C, а дизельного топлива – от 180 до 370 °C. Дизельное топливо воспламеняется в среднем при температуре приблизительно 350 °C (нижний предел – 220 °C), то есть значительно при меньших температурах, по сравнению с бензином (в среднем – 500 °C).

Характеристики

Теплотворная способность

Обычно чистая теплотворная способность H_n обуславливает энергетическое содержание топлива; она соответствует используемому количеству теплоты, выделяемому во время полного сгорания. Полная теплотворная способность H_g, с другой стороны, определяет полную теплоту, включая как механически создаваемое тепло, так и тепло, выделяемое при конденсации водяных паров. Однако, этот компонент не учитывается применительно к автомобилям.

Чистая теплотворная способность дизельного топлива, равная 42,9–43,1 МДж/кг, немного выше, чем у бензина (40,1–41,9 МДж/кг).

Окислители, то есть, топлива или компоненты топлива, содержащие кислород, такие как спиртовые топлива, эфир или метиловые эфиры жирной кислоты, имеют меньшую теплотворную способность, чем чистые углеводороды, поскольку кислород, присутствующий в этих соединениях, не способствует процессу сгорания. Поэтому двигатель, имеющий сопоставимую мощность с мотором, питаемым обычным топливом, имеет повышенный расход топлива.

Теплота сгорания топливовоздушной смеси

Теплота сгорания топливовоздушной смеси определяет выходную мощность двигателя. При стехиометрическом соотношении воздух/топливо теплота сгорания для сжиженных газообразных и жидких автомобильных топлив составляет примерно 3,5–3,7 МДж/м^3.

Содержание серы

В интересах сокращения эмиссии диоксида серы SO_2 и защиты каталитических нейтрализаторов отработавших газов, содержание серы в бензине и дизельном топливе было ограничено с 2009 года до 10 мг/кг на всей территории Европы. Топливо, соответствующее этому предельному значению, известно как «топливо, свободное от серы». Таким образом, достигается обессеривание топлива. До 2009 года для использования в Европе было разрешено, введенное в начале 2005 года, использование топлива с содержанием серы <50 мг/кг. Германия занимает лидирующие позиции в обессеривании топлива – уже с 2003 года, под действием мер в области налогообложения, в этой стране используется топливо, свободное от серы.

В США, предельное значение содержания серы в бензинах, выпускаемых в промышленном масштабе, с 2006 года ограничивается величиной 80 мг/кг, при этом среднее значение для общего количества проданного и импортированного топлива составляет 30 мг/кг. Отдельные штаты, например Калифорния, установили более низкие ограничения.

Кроме того, с 2006 года в США выпускается свободное от серы дизельное топливо (содержание серы составляет максимум 15 мг/кг. ULSD – дизель с ультранизким содержанием серы). К концу 2009 года, однако, только 20% топлива имело содержание серы не более 500 мг/кг.

Содержание серы в сертифицированном топливе служит основанием для изменения регулирующих документов.

Бензины

В Германии продаются следующие бензины: Normal, Super и Super Plus. Отдельные поставщики заменили Super Plus на топливо с октановым числом 100 (V-Power 100, Ultimate 100, Super 100), у которых, кроме октанового числа, были изменены присадки.

В США бензин продается под марками Regular и Premium; они примерно сопоставимы, соответственно, с выпускаемыми в Германии Normal и Super. Бензины Super или Premium, благодаря более высокому ароматическому содержанию основы и добавлению компонентов, содержащих кислород, демонстрируют высокое сопротивление детонации и имеют более предпочтительное применение в двигателях с более высокой степенью сжатия.

Переформулированный бензин – термин, используемый для описания бензина, который, благодаря измененному составу, отличается меньшими испаряемостью и эмиссией отработавших газов, чем обычный бензин. Требования к переформулированному бензину приводятся в Законе о чистом воздухе, принятом в США в 1990 году. Этот закон регламентирует, например, меньшие значения давления насыщенных паров, содержания ароматиков и бензола и температуры выкипания. Он также предписывает использование присадок, очищающих топливную систему от загрязнений и отложений.

Топливные стандарты

Европейский стандарт EN 228 (2008) [1] определяет требования к неэтилированному бензину для использования в двигателях с искровым зажиганием. Определенные для каждой страны отдельные значения изложены в национальных приложениях к этому стандарту. Этилированный бензин в Европе запрещен. Технические требования США к топливам для двигателей с искровым зажиганием содержатся в ASTM D4814 (ASTM – Американское общество по испытанию материалов) [2].

Большинство топлив для двигателей с искровым зажиганием, которые продаются сегодня, имеют в своем составе компоненты, которые содержат кислород (окисляются). В этом отношении особое практическое значение получил этанол, так как «Директива биотоплива ЕС» предусматривает минимальный объем выпуска для возобновляемого топлива (см. Альтернативные виды топлива). Многие страны определили минимальные доли для биогенных компонентов в бензинах, которые достигнуты по большей части за счет использования биоэтанола. Но также используются и эфиры, произведенные из метанола или этанола – MTBE (метилбутиловые эфиры) и ETBE (этилбутиловые эфиры), их добавляют в Европе до 15% по объему.

Добавление спиртов может привести к некоторым трудностям. Спирты увеличивают испаряемость, могут повредить материалы, используемые в топливной системе, например, могут вызвать распухание эластомера и коррозию. Кроме того, в зависимости от содержания алкоголя и температуры, появление даже небольшого количества воды может привести к расслоению и формированию водной спиртовой фазы.

Эфиры не сталкиваются с проблемой расслоения. Эфиры, обладая более низким давлением насыщенных паров, более высокой теплотворной способностью и более высоким октановым числом, чем этанол, являются химически устойчивыми компонентами с хорошей физической совместимостью. Поэтому они демонстрируют преимущества с точки зрения как логистики, так и работы двигателя. По причинам большей устойчивости и большего сохранения CO_2, при установлении квот для биогенного топлива, в основном отдается предпочтение ETBE. Существующие заводы MTBE переоборудуются на производство ETBE.

В европейском стандарте бензина EN 228 содержание этанола ограничено 5% по объему (E 5). В Америке примерно одна треть всех бензинов содержит этанол – до 10% по объему (E 10), для которого давление насыщенных паров, превышающее приблизительно 7 кПа, разрешено согласно американскому стандарту ASTM D4814.

В настоящее время на европейском рынке не все транспортные средства оборудованы материалами, позволяющими функционировать с E 10. Европейский стандарт для E 10 продолжает действовать. Чтобы позволить топливу E 10 быть введенным на немецком рынке, в апреле 2010 года был издан стандарт E DIN 51626–1:2010–04 [3]. Он устанавливает, в дополнение к характеристикам E 10, требования, охраняющие существующий стандарт с максимальным содержанием этанола 5% по объему для транспортных средств, которые не являются совместимыми с E 10. В Бразилии бензин всегда содержит этанол в количестве 22–26% по объему.

Характеристики

Плотность

Европейский стандарт EN 228 ограничивает плотность бензинов диапазоном 720–775 кг/м^3 Поскольку топливо повышенного качества, в основном, включает более высокую пропорцию ароматических соединений, оно имеют большую плотность, чем высокооктановый бензин, а также обладает немного более высокой теплотворной способностью.

Антидетонационные свойства (октановое число)

Октановое число определяет детонационную стойкость бензина (сопротивление детонации). Чем выше октановое число, тем больше сопротивление детонации. Наибольшей детонационной стойкостью обладает изооктан, его стойкость принимается за 100 единиц, наименьшей – п-гептан, стойкость которого принимается равной нулю.

Октановое число топлива определяется на стандартизированном испытательном двигателе. Численное значение соответствует пропорции (в % по объему) изооктана в смеси изооктана и п-гептана, которая демонстрирует то же самое сопротивление детонации, как топливо, которое будет испытываться.

Исследовательский и моторный методы определения октанового числа

Октановое число, определяемое испытаниями по исследовательскому методу [4], имеет сокращение RON (исследовательское октановое число). RON характеризует детонационную стойкость бензинов при использовании их в двигателях, работающих в условиях неустановившихся режимов (движение по городу). Октановое число, определяемое испытаниями по моторному методу [5], имеет сокращение MON (моторное октановое число). MON определяет детонационную стойкость топлива при высоких скоростях.

Моторный метод отличается от исследовательского метода использованием предварительно подогреваемых смесей, более высокой частотой вращения коленчатого вала двигателя и переменным распределением зажигания, таким образом, созданием более строгих тепловых требований к топливу при испытании. Значения MON для одного и того же топлива ниже, чем RON.

Увеличение сопротивления детонации

Нормальный (неочищенный) бензин прямой гонки показывает низкие антидетонационные свойства. Только смешиванием такого бензина с различными компонентами нефтеперегонки, обладающими сопротивлением детонации, (преобразованные компоненты) можно получить топливо с высоким октановым числом, подходящим для современных двигателей. Можно увеличить сопротивление детонации, добавляя компоненты, содержащие кислород, такие как спирты и эфиры.

Присадки, содержащие металл, способные увеличить октановое число (например, ММТ – метилциклопентадиенил трикарбонил марганца), формируют золу во время сгорания и поэтому используются очень редко.

Испаряемость

Для обеспечения успешной эксплуатации двигателя бензины должны удовлетворять достаточно жестким требованиям по испаряемости. С одной стороны, автомобильное топливо должно содержать большое количество высоколетучих соединений для обеспечения надежного запуска холодного двигателя, но, с другой стороны, имеются ограничения по испаряемости топлива, с тем чтобы не ухудшать эксплуатацию и запуск прогретого двигателя. Кроме того, потери топлива за счет испарения, в соответствии с действующими нормативными актами по охране окружающей среды, должны быть на низком уровне. Испаряемость бензинов определяется различными способами.

Стандарт EN 228 классифицирует испаряемость топлив по классам, различающимся по уровням давления насыщенных паров, зависимости температуры испарения от индекса образования паровой пробки VLI. В зависимости от местных климатических условий в европейских странах разработаны свои национальные стандарты испаряемости автомобильного топлива. Различные значения испаряемости устанавливаются в стандартах для лета и зимы.

Температура перегонки

Для того чтобы оценить действие топлива, необходимо рассмотреть различные значения температуры перегонки. Стандарт EN 228 определяет предельные значения, установленные для испаряемых объемов топлива при 70, 100 и 150 °C. Объем испаряемого топлива при 70 °C должен быть достаточным для того, чтобы гарантировать легкий запуск холодного двигателя (это было важно для карбюраторных двигателей). Однако, объем перегоняемого при этой температуре топлива не должен быть слишком большим, иначе на горячем двигателе в топливе будут образовываться пузырьки пара. Объем топлива, перегоняемого при 100 °C, определяет

характеристики прогретого двигателя, влияющие на ускорение и реакцию двигателя, нагретого до нормальной рабочей температуры. Объем топлива, перегоняемого при 150 °С, должен быть достаточно высоким, чтобы минимизировать разжижение моторного масла. В особенности это важно для холодного двигателя, когда плохо испаряемые нелетучие компоненты бензина могут пройти из камеры сгорания по стенкам цилиндров в моторное масло.

Давление насыщенных паров

Давление насыщенных паров, измеряемое при температуре 37,8 °С (100 °F), в соответствии со стандартом EN 13016–1, является показателем безопасности, при котором топливо может прокачиваться из топливного бака автомобиля и закачиваться в него. У давления насыщенных паров существуют пределы, прописанные в технических требованиях. В Германии, например, это максимум 60 кПа летом и максимум 90 кПа зимой.

При разработке системы впрыска топлива также важно знать давление насыщенных паров при более высоких температурах (80–100 °С), поскольку повышение давления насыщенных паров из-за примеси спиртов, например, особенно становится очевидным при более высоких температурах. Если давление насыщенных паров превышает давление впрыска, например, из-за роста температуры двигателя во время эксплуатации автомобиля, это может привести к сбоям, вызванным формированием пузырьков пара.

Фракционный состав

По фракционному составу, выражаемому в относительном объеме испаряемого топлива, оценивается склонность топлива к перегонке.

Падение давления в топливной системе (например, во время движения автомобиля в условиях высокогорья), сопровождающееся повышением температуры топлива, способствует испаряемости топлива и изменению фракционного состава, приводящим к ухудшению условий эксплуатации. Стандарт ASTM D4814 устанавливает, например, для каждого класса испаряемости температуру, при которой отношение пара к жидкости не должно быть больше 20.

Индекс образования паровой пробки

Индекс образования паровой пробки (VLI) является математически рассчитываемой общей суммой десятикратного давления насыщенных паров (в кПа при 37,8 °С) и семикратного объема топлива, которое испаряется при 70 °С. С помощью этого дополнительного предельного значения можно ограничить испаряемость топлива так, чтобы в итоге максимальные значения давления насыщенных паров и температуры конца кипения не могли быть достигнуты в ходе производства топлива.

Таблица 1. Технические характеристики бензинов в соответствии со стандартом DIN EN 228 (действует с ноября 2008 года)

Параметры	Размерность	Величина
Антидетонационные свойства:		
первосортные бензины, min.	RON/MON	95/85
обычные бензины, min. [1]	RON/MON	91/82,5
высококачественные бензины [1]	RON/MON	98/88
Плотность (при 15 °С), min./max.	кг/м3	720/775
Сера, max. (с 2009 года)	мг/кг	10
Содержание кислорода, max.	% по массе	2,7
Содержание этанола, max	% по объему	5,0
Бензол, max.	% по объему	1
Свинец, max.	мг/л	5
Испаряемость:		
давление насыщенных паров летом, min./max.	кПа	45/60
давление насыщенных паров зимой, min./max. [1]	кПа	60/90
объем испарения при температуре 70 °С летом, min./max.	% по объему	20/48
объем испарения при температуре 70 °С зимой, min /max.	% по объему	22/50
объем испарения при температуре 100 °С, min./max.	% по объему	46/71
объем испарения при температуре 150 °С, min./max	% по объему	75/–
температура конца кипения, max.	°С	210
VLI [2], переходный период [3], max. [1]	–	1150

[1] Данные для Германии, [2] VLI – индекс образования паровой пробки, [3] весной и осенью

Присадки

Присадки добавляются для улучшения качества топлива, чтобы противодействовать ухудшению работы двигателя и токичности отработавших газа во время эксплуатации автомобиля. Пакеты присадок в основном используются в сочетании с отдельными компонентами с различными признаками.

Чрезвычайная осторожность и точность требуются при испытании присадок и определении их оптимальных составов и концентраций. Следует избегать нежелательных побочных эффектов. Присадки обычно добавляются к индивидуально маркируемым топливам на бензозаправочных станциях нефтеперерабатывающего завода, когда автоцистерны заполнены (дозирование конечного состояния). Введение присадок в топливный бак автомобиля подвергает транспортное средство риску технических сбоев, если эти присадки несовместимы с конструкцией автомобиля.

Ингибиторы загрязнения топливной системы (моющие присадки

Системы подачи топлива автомобильного двигателя (топливные форсунки, пусковые клапаны) необходимо предохранять от загрязнений и осадочных отложений. Поддержание этих систем в незагрязненном состоянии является обязательным условием безопасной эксплуатации двигателя и снижения до минимума содержания токсичных компонентов в отработавших газах. Для достижения этого в топливо добавляются специальные моющие присадки.

Ингибиторы коррозии

Проникновение извне воды/влажности может привести к коррозии компонентов топливной системы. Коррозия может быть эффективно устранена добавлением ингибиторов коррозии, которые формируют тонкую защитную пленку на металлической поверхности.

Стабилизаторы окисления

Присадки, противодействующие старению топлива (антиоксиданты) добавляются в топливо, для того чтобы улучшить его стабильность во время хранения. Эти присадки предотвращают быстрое окисление топлива кислородом воздуха.

Дизельное топливо

Топливные стандарты

Требования для дизельных топлив в Европе устанавливает стандарт EN 590 (2009) [6]. Наиболее важные характеристки дизельных топлив изложены в табл. 2. Даже особые марки дизельных топлив, продаваемые на некоторых бензозаправочных станциях (например, Super, Ultimate, V-Power), удовлетворяют этому стандарту. У всех этих дизельных топлив существуют различия в основных характеристиках и в составе присадок. V-Power содержит 5% по объему синтетического дизельного топлива.

В соответствии со стандартом EN 590, в дизельное топливо допускается добавлять до 7% по объему биодизеля (FAME – метилэфиры на основе жирных кислот), качество которого предусмотрено нормами EN 14214 (2009). Добавка биодизеля улучшает смазывающую способность топлива, но также уменьшает стабильность к окислению. С целью проверки стабильности к окислению, в 2009 году был дополнен стандарт EN 590, в который также был включен параметр запаса по старению, измеряемый как индукционный период при 110 °C, составляющий, по крайней мере, 20 часов в условиях испытаний, определенных нормами EN 15751.

Стандарт США для дизельных топлив ASTM D975 [7] определяет меньшее число характеристик и устанавливает менее строгие ограничения. Он разрешает добавлять максимум 5% по объему биодизеля, который должен удовлетворять требованиям стандарта ASTM D6751.

Характеристики

Цетановое число и дизельный индекс

Цетановое число (CN) характеризует воспламеняемость дизельного топлива [8]. Чем выше цетановое число, тем больше тенденция топлива к воспламенению. Поскольку дизельный двигатель обходится без подаваемой извне искры зажигания, топливо должно воспламеняться спонтанно (самовоспламенение) и с минимальной задержкой воспламенения при впрыскивании в горячий воздух, сжатый в камере сгорания. Цетановое число, равное 100, соответствует легко воспламеняемому н-гексадекану (цетану), а цетановое число, равное 0, соответствует медленно воспламеняющемуся альфаметилнафталину. Цетановое число дизельного

топлива определяется на стандартизированном одноцилиндровом испытательном двигателе CFR (CFR – объединенный комитет по изучению моторных топлив). Степень сжатия измеряется с постоянной задержкой воспламенения. Сравниваемые топлива, содержащие цетан и альфаметилнафталин, испытываются с установленной степенью сжатия. Содержание цетана в смеси изменяется, пока не будет получена та же самая задержка воспламенения. Содержание цетана в процентах определяет цетановое число.

Цетановое число, превышающее 50, более предпочтительно для оптимальной работы современных двигателей, особенно в условиях холодного старта. Высококачественные дизельные топлива содержат большой процент парафинов с высокими цетановыми числами. Наоборот, ароматические углеводороды имеют низкую воспламеняемость.

Еще одним параметром воспламеняемости топлива является дизельный индекс, который вычисляется на основе плотности топлива и различных точек на кривой кипения. Этот чисто математический параметр не принимает во внимание влияние присадок, улучшающих свойства цетана, на воспламеняемость. Для того чтобы ограничить регулирование цетанового числа посредством присадок, улучшающих свойства цетана, цетановое число и дизельный индекс были включены в список требований стандарта EN 590. Топливо, цетановое число которого увеличено присадками, улучшающими свойства цетана, действует по-другому во время сгорания в двигателе, чем топливо с тем же самым естественным цетановым числом.

Температурный диапазон изменения фракционного состава

Температурный диапазон изменения фракционного состава топлива, то есть температурный диапазон, при котором испаряется топливо, зависит от состава топлива. Низкая точка кипения делает топливо более подходящим для использования в условиях холодного климата, но также означает более низкое цетановое число и плохая смазывающая способность. Это увеличивает риск изнашивания компонентов системы впрыска. Однако, если Точка кипения высокая, это может привести к большей эмиссии сажи и появлению нагара в распылителях форсунок. Это, в свою очередь, вызывает образование отложений в результате химического разложения нелетучих топливных компонентов в отверстиях и колодце распылителя и добавление остаточных продуктов сгорания. Когда точка кипения выше, возможно протекание топлива по стенкам цилиндров и смешивание с моторным маслом. Поэтому процент нелетучих топливных компонентов не должен быть слишком высоким. Ограничение добавки биодизеля до максимальных 7% по объему также вызвано его высокой точкой кипения (320–360 °C).

Предел фильтрации

Осаждение кристаллов парафина при низких температурах может привести к забиванию топливного фильтра и, в конечном счете, к прерыванию подачи топлива. В худшем случае макрочастицы парафина начинают выпадать при 0 °C или при еще больших температурах. Пригодность топлива для использования

Таблица 2. Основные технические характеристики дизельных топлив в соответствии со стандартом DIN EN 590 (действует с октября 2009 года)

Параметры		Размерность	Величина
Цетановое число, min.		–	51
Плотность (при 15 °C), min./max		кг/м³	820/845
Дизельный индекс, min.		–	46
Вязкость (при 40 °C), min./max		мм²/с	2,0/4,5
Содержание серы, max.		мг/кг	10
Смазывающая способность, «диаметр пятна изнашивания», max.		мкм	460
Содержание метилэфиров на основе жирных кислот (FAME), max.		% по объему	7
Стабильность к окислению	нерастворимый остаток, max.	г/м³	25
	индукционный период (при 110 °C), min	часы	20
Содержание воды, max.		мг/кг	200
Общее загрязнение, max		мг/кг	24
CFPP 1) в шести сезонных классах, max 2)		°C	+5...–20
Точка воспламенения		°C	> 55

[1] Предел фильтрации, [2] определяется национальными стандартами, для Германии –0... –20 °C

в холодное время оценивается «пределом фильтрации» (CFPP). Европейский стандарт EN 590 регламентирует показатель CFPP для различных классов дизельных топлив, и, кроме того, это предельное значение может быть установлено отдельными государствами-членами ЕС, в зависимости от преобладающих географических и климатических условий.

Прежде, владельцы автомобилей с дизельным двигателем иногда добавляли в топливный бак высокооктановый бензин, чтобы улучшить показатели дизельного топлива на холоде. Эта практика не требуется в настоящее время, когда топливо соответствует стандартам, и это может в любом случае привести к повреждению, особенно в системах с топливным впрыском под высоким давлением.

Точка воспламенения

Точка воспламенения – температура, при которой количество испарений топлива, накопившихся в атмосфере, оказывается достаточным для воспламенения топливовоздушной смеси. Соображения безопасности (при перевозке и хранении топлив) диктуют необходимость соответствия дизельного топлива требованиям стандарта класса A III «Опасные материалы», где определено, что точка воспламенения должна быть выше 55 °C. Добавление в дизельное топливо менее 3% бензина оказывается достаточным для того, чтобы возгорание горючей смеси могло произойти при комнатной температуре.

Плотность

Энергетическое содержание дизельного топлива в единице объема увеличивается с ростом плотности. Учитывая постоянное срабатывание форсунок (то есть, постоянный впрыск определенного количества топлива), использование топлива с плотностью, изменяющейся в широких пределах, вызывает изменение состава смеси (изменение коэффициента избытка воздуха λ) из-за колебаний теплотворной способности топлива. Когда двигатель работает на топливе, у которого имеется большой разброс по плотности, это приводит к увеличению эмиссии сажи; если плотность топлива уменьшается, этот параметр также снижается. Поэтому должны соблюдаться требования к низкому разбросу плотности дизельноого топлива.

Вязкость

Вязкость – мера сопротивления течения топлива из-за внутреннего трения. Если вязкость слишком мала, это приводит к увеличенным потерям утечек топлива, большему нагреванию системы впрыска и усиленному риску изнашивания и кавитационной эрозии. Слишком большая вязкость, имеющая место, например, при использовании чистого биодизеля (FAME), вызывает пиковое давление впрыска при высоких температурах в таких, например, топливных системах, как электронно-управляемые насос-форсунки, по сравнению с нефтяным дизельным топливом. И наоборот, система впрыска топлива не может развивать допустимое пиковое давление при использовании нефтяного дизельного топлива. Высокая вязкость также изменяет форму распыла из-за формирования больших капель.

Смазывающая способность

Смазывающая способность дизельных топлив важна не столько при гидродинамическом трении, сколько при смешанном. Применение новых гидрогенизированных и десульфированных дизельных топлив с улучшенными экологическими характеристиками приводит к повышенному износу топливных насосов высокого давления.

Десульфирование также приводит к удалению компонентов топлива, которые важны для обеспечения смазывающей способности. В топливо приходится добавлять специальные присадки, улучшающие смазочную способность, чтобы избежать этих проблем. Стандарт EN 590 предписывает обеспечение минимальной смазочной способности, определяемой диаметром пятна изнашивания, который должен составлять максимум 460 мкм при испытаниях на установке с высокочастотным возвратно-поступательным движением рабочего органа (установка HFRR [9]).

Показатель углеродистых отложений

Показатель углеродистых отложений характеризует свойство дизельного топлива образовывать нагар на поверхностях выпускного отверстия топливных форсунок. Механизм образования нагара имеет комплексный характер и не поддается простому описанию. Продукты испарения дизельного топлива оказывают незначительное влияние на образование нагара (закоксовывание).

Общее загрязнение

К общему загрязнению относятся суммарные включения нерастворимых посторонних макрочастиц в топливе, таких как песок, продукты коррозии, и нерастворимых органических компонентов, включая продукты старения полимеров, содержащихся в топливе. Стандарт EN 590 допускает максимальное общее загрязнение топлива

24 мг/кг. Имеющие большую твердость силикаты, которые содержатся в минеральной пыли, особенно разрушительны для топливных систем впрыска высокого давления с узкими распыливающими отверстиями. Даже фракция твердых макрочастиц с допустимым общим уровнем загрязнения может вызывать эрозионное и абразивное изнашивание (например, в соленоидных клапанах). Изнашивание такого рода приводит к утечке клапана, что понижает давление впрыска, ухудшает работу двигателя и увеличивает эмиссию твердых частиц с отработавшими газами. Типичные европейские дизельные топлива содержат приблизительно 100 000 макрочастиц на 100 мл. Особенно критичные размеры макрочастиц – 4–7 мкм. Поэтому необходимы высокоэффективные топливные фильтры с хорошей эффективностью фильтрации, с тем чтобы предотвратить ущерб, наносимый макрочастицами.

Вода в дизельном топливе

Дизельное топливо может абсорбировать воду в количестве приблизительно 100 мг/кг при комнатной температуре. Предел растворимости определяется составом дизельного топлива, его присадками и окружающей температурой. Стандарт EN 590 допускает максимальное содержание воды в топливе 200 мг/кг. Хотя во многих странах бывает более высокое содержание воды в дизельном топливе, исследование рынка показывает, что содержание воды редко превышает 200 мг/кг. Образцы часто не обнаруживают воды, или обнаружение является неполным, так как вода оседает на стенках в форме нерастворенной «свободной» воды, или она скапливается на дне топливного бака. Принимая во внимание, что растворенная вода не повреждает топливную систему впрыска, нужно иметь ввиду, что даже очень небольшое количество свободной воды за короткий период времени может вызвать изнашивание или коррозионное повреждение компонентов системы впрыска.

Присадки

Присадки к автомобильным бензинам находят применение и для дизельного топлива. Различные вещества объединены в пакеты присадок, чтобы одной добавкой достигнуть множества целей. Концентрация Поскольку полная концентрация комплекта присадок в топливе не превышает 0,1%, физические характеристики топлива – такие как плотность, вязкость, и фракционный состав – остаются неизменными.

Присадки, повышающие смазывающую способность

Смазывающую способность дизельных топлив с бедными свойствами смазывания, вызванными, например, процессами гидратации во время десульфирования, можно улучшить, добавляя в топливо жирные кислоты или глицериды. Биодизель также содержит глицериды как побочный продукт. В этом случае, в дизельное топливо, если оно уже содержит какую-то добавку биодизеля, присадки, улучшающие смазывающую способность, можно не добавлять.

Присадки, повышающие цетановое число

Присадками, повышающими цетановое число, являются спиртовые производные сложных эфиров азотной кислоты, добавление которых приводит к сокращению задержки воспламенения. Эти присадки помогают, особенно во время холодного пуска, предотвратить увеличение шума сгорания (шум двигателя) и сильное дымление.

Присадки, повышающие текучесть

Присадки, повышающие текучесть, состоят из полимерных материалов, которые понижают предел фильтрации. Они, в основном, добавляются в зимний период, чтобы гарантировать безотказную работу двигателя при низких температурах. Хотя эти присадки не могут предотвратить выпадение парафиновых кристаллов в дизельном топливе, они могут строго ограничить их рост. Размеры образуемых кристаллов становятся настолько маленькими, что они могут проходить через поры топливного фильтра.

Моющие присадки

Моющие присадки чищают систему подачи топлива с целью формирования эффективной рабочей смеси; замедляют образование отложений на поверхностях выпускного отверстия форсунок топливного насоса.

Ингибиторы коррозии

Ингибиторы коррозии, покрывающие поверхности металлических деталей, повышают коррозионную стойкость металлических элементов топливной системы двигателя.

Антипенные присадки

Добавление антипенной присадки позволяет избежать чрезмерного вспенивания топлива, когда автомобиль быстро заправляется горючим.

Альтернативные виды топлив

Относительно альтернативных видов топлива делается различие между ископаемым топливом, которое производится из угля, сырой нефти или природного газа, и регенеративным топливом, которое создается из возобновляемых источников энергии, таких как биомасса, энергия ветра или солнечная энергия.

Альтернативное ископаемое топливо включает сжиженный нефтяной газ, природный газ, синтетическое жидкое топливо, созданное из природного газа (GtL – преобразование газа в жидкость), и водород, произведенный из природного газа. Уголь – исходный материал для получения метанола или синтетического жидкого топлива (CtL – преобразование угля в жидкость).

Регенеративное топливо включает метан, метанол и этанол, если это топливо создано из биомассы. Кроме того, на биомассе основано регенеративное топливо, называемое биодизелем (FAME), а также гидрогенизируемые растительные масла (биопарафины). Изготовление синтетического жидкого топлива из целлюлозы (BtL – преобразование биомассы в жидкость) все еще находится на ранней стадии развития технологии.

Водород, извлекаемый электролизом, классифицируется как регенеративное топливо, если используемый для получения водорода электрический ток создается возобновляемыми источниками (энергия ветра, солнечная энергия). Также может производиться регенеративный водород, получаемый из биомассы.

За единственным исключением водорода, все регенеративные и ископаемые виды топлива содержат углерод и поэтому при их сгорании образуется диоксид углерода CO_2. Однако в случае с топливом, производимым из биомассы, CO_2, поглощаемый растениями во время их роста, возмещается в эмиссии, производимой во время сгорания.

Биоэтанол

Изготовление из сахара и крахмала

Биоэтанол, получаемый из продуктов, содержащих сахар и крахмал, является наиболее широко производимым биотопливом во всем мире. На заводах, выпускающих сахар (как продукт сахарного тростника или сахарной свеклы), добавлением дрожжей вызывается брожение, в результате чего образуется этанол. Когда биоэтанол получают из крахмала зерновых, пшеница или рожь обрабатываются вместе с ферментами, для того чтобы частично расколоть длинноцепные молекулы крахмала. Во время последующего осахаривания происходит расщепление на молекулы декстрозы при помощи глюкоамилазы. Дальнейшим шагом создания биоэтанола является процесс брожения с использованием дрожжей.

Изготовление из лигноцеллюлозы

Ферменты могут также использоваться для производства биоэтанола из лигноцеллюлозы. Она формирует структуру растительной клетки и содержит главный лигнин элементов, гемицеллюлозу и целлюлозу. Преимущество этого процесса состоит в том, что может использоваться все растение, а не только его часть, содержащая сахар или крахмал. Процесс, названный «процессом Iogen», обещает высокие выработки и хорошую экономическую эффективность. Получаемый по этой новой технологии продукт также упоминается как биоэтанол 2-го поколения.

Биоэтанол обладает свойствами, которые очень подходят для того, чтобы его добавлять в бензины, особенно для увеличения октанового числа чистого бензина. Именно поэтому фактически все стандарты бензина разрешают добавление этанола как компонента смеси. Даже биотопливная политика Европейского союза заставляет ожидать, что проникновение на рынок биоэтанола и сохранение его пропорции в бензинах продолжатся, если поддержка технологий создания биоэтанола будет гарантирована.

Биоэтанол также может использоваться в качестве чистого топлива в двигателях с искровым зажиганием в транспортных средствах с гибким выбором топлива (FFV). Эти транспортные средства могут работать как на бензине, так и на любой смеси бензина и этанола. Из-за проблем запуска холодного двигателя при низких температурах, успешной на рынке оказалась максимальная концентрация этанола 85% (E 85) летом и 70–75% зимой. Качество E 85 определено для Европы в топливном стандарте prEN 15293 и для США – в стандарте ASTM D5798.

Метанол

Метанол, по существу, производится не регенеративными средствами, а из источников энергии в виде окаменелостей, таких как ка-

менноугольный и природный газ, и поэтому не вносит вклад в сокращение эмиссии CO2. Такие страны как Китай, которые планируют покрыть высокие топливные запросы за счет угля, будут все активней использовать метанол в будущем. В этом случае топливо M 15, кажется, представляет верхний предел использования в обычных двигателях с искровым зажиганием. В Китае обсуждается применение топлива M 85, аналогичного E 85, для питания транспортных средств с гибким выбором топлива.

С тем же самым содержанием спиртов топливо из метанола имеет значительно большую коррозийную активность, чем топливо из этанола. При этом намного быстрей происходит расслоение, если топливо содержит воду. Из-за негативного опыта использования метанола в качестве топлива во время нефтяного кризиса 1973 года, а также из-за его токсичности, применение метанола как компонента смеси было снова прекращено в Германии. В мировом масштабе только смеси метанола производятся в настоящее время очень редко и лишь, по большей части, с содержанием значительно ниже 5 % (M 5).

Сжатый природный газ

Главный элемент природного газа – метан (CH_4), его содержание составляет 83–98%. Другие элементы – инертные газы, такие как углекислый газ, азот и короткоцепные углеводороды.

Природный газ доступен во всем мире и, после добычи, требует относительно низких затрат на подготовку. В зависимости от его происхождения, однако, изменяется его состав, что приводит к колебаниям плотности, теплотворной способности и сопротивления детонации. Свойства природного газа как топлива определены для Германии в стандарте DIN 51624 [10].

Метан также может быть получен из биомассы, то есть из жидкого удобрения или твердых отходов. Этот метод обеспечивает закрытый кругооборот CO_2 при очень низкой полной эмиссии CO_2.

Природный газ сохраняется или в виде сжатого природного газа (CNG) в баллонах при давлении 200 бар, или в виде сжиженного природного газа (LNG) при –162 °C в стойком к холоду резервуаре. LNG занимает только одну треть объема хранения CNG, однако хранение LNG требует высоких расходов энергии для того, чтобы превратиться в жидкость. Поэтому природный газ продается на бензозаправочных станциях в виде CNG.

Отношение водород/углерод у природного газа составляет примерно 4:1, этот же показатель для бензина равен 2,3:1. В результате, из-за более низкого количества углерода в природном газе, при сжигании он производит меньше CO_2 и больше H_2O, чем бензин. Двигатель с искровым зажиганием, работая на сжатом природном газе, без дальнейшей оптимизации, уже создает приблизительно на 25% меньше эмиссии CO_2, чем при работе на бензине (при сопоставимой выходной мощности).

Сжиженный нефтяной газ

Сжиженный нефтяной газ (LPG) получают при добыче сырой нефти и во время различных процессов очистки. LPG представляет собой смесь главных компонентов – пропана и бутана. Он может быть сжижен при комнатной температуре под сравнительно низким давлением.

Поскольку сжиженный нефтяной газ имеет более низкое содержание углерода, чем бензин, при сгорании LPG эмиссия CO_2 также примерно на 10% меньше. Октановое число LPG составляет приблизительно 100–110 RON. Требования к LPG для использования в автомобилях установлены в европейском стандарте EN 589 [11].

Водород

Водород может быть получен химическим процессом из природного газа, угля, сырой нефти или биомассы, либо электролизом из воды. Сегодня водород, в основном, получают из природного газа при его каталитическом взаимодействии с водяным паром. При использовании водорода в качестве топлива эмиссия CO_2 не обязательно является преимуществом по сравнению с бензином, дизельным топливом или прямым использованием природного газа в двигателе внутреннего сгорания.

Сокращение эмиссии CO_2 достигается тогда, когда водород регенеративно получают из биомассы или электролизом из воды, при условии, что для этого используется регенеративно генерируемый электрический ток. При сгорании водорода в двигателе эмиссия CO_2 локально не происходит.

Хранение

У водорода может быть очень высокая плотность энергии относительно массы (прибли-

зительно 120 МДж/кг, что почти в три раза больше, чем у бензина), но его плотность энергии относительно объема очень низка из-за небольшой удельной плотности. Когда дело доходит до хранения, это означает, что водород должен быть сжат под давлением (в 350–700 бар) или сжижен (криогенное хранение при –253 °C), с тем чтобы достигнуть приемлемого объема резервуара. Другой способ хранения для водорода состоит в том, чтобы он сохранялся в виде гибридного соединения.

Применение в автомобилях

Водород может использоваться как в приводах с топливными элементами, так и непосредственно в двигателях внутреннего сгорания. В долгосрочной перспективе акцент, как ожидают, будет сделан на его применении в топливных элементах. В этом случае достигается лучшая эффективность, чем при использовании H_2 в двигателях внутреннего сгорания.

Биодизель

В настоящее время биодизель – самое важное альтернативное топливо для дизельных двигателей. Термин «биодизель» охватывает сложные эфиры жирных кислот, представляющие собой трансэстерифицированные метанолом или этанолом масла или смазки. В результате образуются метилэфиры жирных кислот (FAME) или этилэфиры жирных кислот (FAEE). Молекулы биодизеля, с точки зрения размера и свойств, намного более подобных структуре дизельного топлива, чем растительного масла. Поэтому биодизель не может ни при каких обстоятельствах приравниваться к растительным маслам. Однако, свойства биодизеля значительно отличаются от свойств нефтяного дизельного топлива, поскольку эфиры жирных кислот являются полярными и химически реагирующими. Обычное дизельное топливо, с другой стороны,– инертная и неполярная смесь парафинов и ароматических соединений.

В качестве исходного материала для биодизеля могут использоваться растительные масла или животные жиры. В Европе используется, прежде всего, рапсовое масло, в Северной и Южной Америке – соевое масле, в Азии – пальмовое масло и на индийском субконтиненте – масло ятрофы. Также используются производимые во всем мире метилэфиры, получаемые из отходов (UFOME). Из-за глобальной торговли биодизелем и его сырьем, топливо, содержащее FAME, как правило, содержит смеси из различных источников.

Поскольку эстерификация технически легче выполняется с метанолом, чем с этанолом, производство метилэфиров этих масел предпочтительно. Метанол, в основном, производится из угля. Поэтому, метилэфиры жирных кислот не могут, строго говоря, считаться полностью биогенными.

С другой стороны, этилэфиры жирных кислот, при производстве которых используется биоэтанол, на 100% состоят из биомассы.

Свойства биодизеля определяются разными факторами. Различные растительные масла отличаются по составу блоков жирных кислот и демонстрируют типичные образцы жирной кислоты. Тип и количество ненасыщенных жирных кислот имеют, например, решающее влияние на стабильность биодизеля. Свойства также определяются предварительной обработкой растительного масла и производственным процессом биодизеля.

Качество биодизеля отрегулировано в топливных стандартах. Если продукт технически надежен, ограничений относительно сырья можно избежать. Поэтому требования к уровню качества биодизеля преобладающе описаны перечислением свойств материала. Важно гарантировать хорошую стабильность против старения (стабильность к окислению) и устранить загрязнения, вызванные процессом производства биодизеля.

Европейский стандарт EN 14214 (2010) [12] является наиболее всесторонней спецификацией для биодизеля, применяемой во всем мире, независимо от того, в каком качестве используется биодизель – чистого топлива или примеси к дизельному топливу. Биодизель хорошего качества определен в этом стандарте (табл. 3).

Американский стандарт биодизеля ASTM D6751 [13] менее ориентируется на качество. Например, минимальное требование стабильности к окислению составляет только половину от значения, допускаемого в EN 14214. Это увеличивает риск проблем, которые могут возникнуть в результате старения топлива, в особенности с учетом заявленного предельного значения и в условиях длительной эксплуатации.

Другие страны, такие как Бразилия, Индия и Корея, приспособили свои требования к биодизелю (B 100), в большой степени, к европейскому стандарту EN 14214.

Применение в автомобилях

Чистый биодизель (В 100) ранее использовался в Германии, в основном, в качестве топлива для грузовиков. Высокий годичный пробег коммерческих автомобилей приводит к быстрому расходу топлива, что позволяет избегать проблем недостаточной стабильности к окислению.

С точки зрения эксплуатации двигателя, более благоприятные условия работы наблюдаются при использовании биодизеля в смеси с нефтяным дизельным топливом. Наличие нефтяного дизельного топлива гарантирует достаточную стабильность, биодизель, в то же время, обеспечивает хорошую смазывающую способность эффект. На практике важно специфицировать не только чистый компонент В 100, но также и смесь дизельного топлива и биодизеля, предлагаемых на рынке. В случае смеси наблюдается тенденция к использованию от незначительной добавки до максимального 7-процентного содержания биодизеля (В 7 в Европе).

Используются и более высокие пропорции биодизеля (В 30 во Франции, В 20 в США). Однако, в случае большого содержания биотоплива высокая точка кипения биодизеля может привести к его активному попаданию из камеры сгорания, через уплотнения на стенках цилиндров, в моторное масло. Это затрагивает, прежде всего, транспортные средства, которые оснащены топливными фильтрами тонкой очистки и у которых регенерация происходит посредством повторного впрыска. В зависимости от применения, это возможно, особенно, при частичных нагрузках, когда происходит неприемлемо высокое впрыскивание биодизеля, что, в результате, потребует более коротких интервалов замены масла.

Рапсовое масло

Рапсовое масло использовалось с большим успехом в более старых дизельных двигателях, отвечающих минимальным требованиям к эмиссии отработавших газов. Из-за его повышенных плотности и вязкости вместе с высокой испаряемостью, рапсовое масло не подходит для использования в современных дизельных двигателях с системами впрыска с высоким давлением.

Парафиновое дизельное топливо

Чистое парафиновое топливо полностью состоит из насыщенных углеводородов. Благодаря отсутствию ароматиков, значительно уменьшена эмиссия HC и CO.

Парафиновое топливо может быть создано тремя различными способами, включающими:

- процесс Фишера-Тропша [14];
- гидрирование растительных масел;
- процесс COD (преобразование олефинов в продукты перегонки).

Процесс Фишера-Тропша

Исходным продуктом является синтез-газ, который состоит из водорода и угарного газа и может быть получен из природного газа, угля или биомассы. Пропуская синтез-газ через катализаторы, можно получить n-парафины – линейные углеводороды с неразветвленной цепью. Катализаторы Фишера-Тропша функционируют достаточно неопределенно, так что образуются самые разные компоненты, начиная с короткоцепных бензина, керосина и дизельных парафинов, и кончая маслами

Таблица 3. Характеристики метилэфиров жирных кислот (FAME) в соответствии с требованиями стандарта DIN EN 14214 (действует с апреля 2010 года)

Параметры	Размерность	Величина
Плотность (при 15 °C), min./max.	кг/м³	860/900
Вязкость (при 40 °C), min./max.	мм²/с	3,5/5,0
Содержание серы, max.	мг/кг	10
Содержание щелочных металлов (Na + K), max	мг/кг	5,0
Содержание щелочноземельных металлов (Ca + Mg), max.	мг/кг	5,0
Содержание глицерина max.	% по массе	0,25
Кислотное число, max.	мг KOH/г	0,50
Стабильность к окислению (индукционный период при 110 °C), min	часы	6
Содержание воды, max.	мг/кг	500
Общее загрязнение, max	мг/кг	24
CFPP [1]	[1]	[1]
Точка воспламенения	°C	> 101

[1] Предел фильтрации установлен в национальных дополнениях стандарта EN 590, если FAME применяется как чистое топливо

и восками с высокой молекулярной массой. По экономическим причинам, разделение производимой смеси, по большей части, оптимизируется в расчете на максимальную текучесть дизельного топлива. Топливо, получаемое в соответствии с этим процессом, известно как синтетическое дизельное топливо.

Такое топливо первоначально также упоминалось как проектируемое топливо, поскольку существовало представление, что состав синтетического дизельного топлива может быть точно приспособлен к требованиям дизельного двигателя. Однако, из-за широкого диапазона продуктов, получаемых синтезом Фишера-Тропша, понятие производства топлива определенного состава больше не кажется оправданным.

Термины GtL (преобразование газа в жидкость), CtL (преобразование угля в жидкость) и BtL (преобразование биомассы в жидкость) обычно используются, в зависимости от того, были ли парафины получены из природного газа, угля или биомассы.

Производство CtL и GtL является экономически важным. Производство GtL только связано с крупными месторождениями природного газа, в том случае если природный газ не может быть предназначен для прямого использования. Из-за серьезных затрат использование GtL и CtL было до настоящего времени ограничено специальными рынками.

Продукты CtL и GtL базируются на источниках энергии окаменелостей, таким образом, никакого сокращения эмиссии CO_2 не достигается. Преимущество BtL заключается в отсутствии эмиссии CO_2. Однако, топливо, основанное на процессе перехода из одного состояния в другой, развиваемом компанией «Choren», еще не поступает на рынок.

Подход в создании этих топлив существенно отличается от общепринятых методов, которые основаны на преобразовании существующих компонентов, таких как жиры или сахароза, через химическое или ферментативное разделение (трансэстерификация, брожение) в топливо (биодизель или биоэтанол). Именно поэтому синтетическое топливо также известно как топливо 2-го поколения.

Гидрирогенизация растительных масел

Парафиновое дизельное топливо может быть получено гидрогенизацией жиров и масел. В отличие от трансэстерификации в биодизель, при преобразовании газа, содержащего водород, предъявляются меньшие требования к происхождению и качеству исходных материалов. Результатом гидрогенизации является крекинг жиров и масел, во время которого также удаляются все атомы кислорода и ненасыщенные связи. Длинноцепные парафины получают из жирных кислот, глицерин преобразуется в пропан и кислород соединяется с водой. Поскольку парафины получают из биомассы, они упоминаются как биопарафины. Производство биопарафинов может быть осуществлено на отдельных заводах или даже объединено в существующие процессы нефтеперегонного завода.

Таблица 4. Характеристики парафиновых дизельных топлив в соответствии со спецификацией CWA 15940, разработанной группой экспертов CEN (действует с февраля 2009 года)

Параметры		Размерность	Величина
Цетановое число, min./max.	класс A	–	70/–
	класс B	–	51/66
Плотность (при 15 °C), min./max.		кг/м³	770/800
Вязкость (при 40 °C), min./max.		мм²/с	2,0/4,5
Содержание серы, max.		мг/кг	5
Полное содержание ароматических углеводородов, max		% по массе	1
Содержание полиароматических углеводородов, max.		% по массе	0,1
Содержание олефинов, max		% по массе	0,1
Смазывающая способность, «диаметр пятна износа», max		мкм	460
Добавка FAME		–	Не предусмотрена
Содержание воды, max.		мг/кг	200
Общее загрязнение, max.		мг/кг	24
CFPP в шести сезонных классах, max. [2]		°C	+5 –20
Точка воспламенения		°C	> 55

[1] Предел фильтрации; [2] установлен в национальных дополнениях стандарта, для Германии –0.. –20

Гидрогенизация растительных масел развивается все более и более как существенная альтернатива производству биодизеля.

Процесс COD

Третий способ получения парафинов, состоящий в преобразовании олефинов в соответствии с процессом COD (преобразование олефинов в продукты перегонки), часто применяется только как последующий шаг к предыдущим процессам нефтеперегонного завода. В этом случае продукты олефиновых фракций преобразуются олигомеризацией и гидрогенизацией в парафины.

Независимо от типа производства, созданы парафиновые смеси углеводородов с подобными химическими составами и превосходными характеристиками двигателя. Топливо, свободное от серы и ароматиков, имеет высокое цетановое число. Однако, плотность – меньше нижней границы предельных значений, определенных стандартом EN 590. Требования к парафиновым дизельным топливам разработаны группой экспертов Европейского комитета по стандартизации (CEN) и изданы в виде спецификации CWA 15940 (2009) [15], табл. 4. Для того чтобы достигнуть данного уровня качества, к трем описанным выше производственным процессам прилагается дополнительный шаг изомеризации, особенно для получения необходимой термостойкости.

Парафиновые углеводороды идеально подошли для маркетинга в качестве компонентов смеси в дизельных топливах Premium. Кроме того, дизельные топлива, которые не в состоянии достигнуть предельных значений, установленных в стандарте EN 590, могут быть улучшены добавлением GtL до такой степени, что они соответствуют стандарту. Использование чистого парафинового топлива оправдано, прежде всего, в местах скопления населения, чтобы, тем самым, способствовать уменьшению загрязнения воздуха на локальном уровне.

References

[1] DIN EN 228: 2008, Automotive fuels – Unleaded petrol – Requirements and test methods.
[2] ASTM D4814-09b, Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel
[3] E DIN 51626-1:2010-04, Kraftstoffe fur Kraftfahrzeuge – Anforderungen und Prufverfahren – Teil 1: Ottokraftstoff E10 und Ottokraftstoff E5
[4] EN ISO 5164:2005, Petroleum products – Determination of knock characteristics of motor fuels – Research method (ISO 5164:2005).
[5] EN ISO 5163:2005, Petroleum products – Determination of knock characteristics of motor and aviation fuels – Motor method (ISO 5163:2005).
[6] DIN EN 590: 2009, Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods.
[7] ASTM D975-09b, Standard Specification for Diesel Fuel Oils.
[8] EN ISO 5165:1998, Petroleum products – Determination of the ignition quality of diesel fuels – Cetane engine method (ISO 5165:1998).
[9] EN ISO 12156-1:2006, Diesel fuel – Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig – Part 1: Test method (ISO 12156-1:2006).
[10] DIN 51624: 2008, Automotive fuels – Compressed natural gas – Requirements and test methods.
[11] DIN EN 589: 2008, Automotive fuels – LPG – Requirements and test methods.
[12] DIN EN 14214: 2010, Automotive fuels – Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – Requirements and test methods.
[13] ASTM D6751-09, Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels.
[14] L. Konig, J. Gaube: Fischer-Tropsch-Synthese, Neuere Untersuchtung und Entwicklungen. Article in Chemie – Ingenieur – Technik, Volume 55/1, 1983.
[15] CWA 15940:2009, Automotive fuels – Paraffinic diesel from synthesis or hydrotreatment – Requirements and test methods.

Свойства жидких топлив и углеводородов

Вид топлива	Плотность, кг/л	Состав основных элементов, % по весу	Температура испарения, °C	Скрытая теплота испарения [1], кДж/кг	Удельная теплота сгорания [1], МДж/кг	Температура воспламенения, °C	Расчетная потребность воздуха, кг/кг	Содержание горючей смеси, % по объему воздуха: Нижний предел	Верхний предел
Топливо для двигателей с искровым зажиганием:									
обычный бензин	0,720 0,775	86 C, 14 H	25. 210	380 500	41,2. 41,9	≈ 300	14,8	≈ 0,6	≈ 8
Premium	0,720 .0,775	86 C, 14 H	25 ..210	–	40,1…41,6	≈ 400	14,7	–	–
Авиационный бензин	0,720	85 C, 15 H	40…180	–	43,5	≈ 500	–	≈ 0,7	≈ 8
Керосин	0,77 . 0,83	87 C, 13 H	170…260	–	43	≈ 250	14,5	≈ 0,6	≈ 7,5
Дизельное топливо	0,820 .0,845	86 C, 14 H	180…360	≈ 250	42,9…43,1	≈ 250	14,5	≈ 0,6	≈ 7,5
Сырая нефть	0,70…1,0	80…83 C, 10…14 H	25…360	222 .352	39,8…46,1	≈ 220	–	≈ 0,6	≈ 6,5
Гудрон	0,850.. 0,90	84 C, 11 H	200…360	–	40,2 41,9	–	13,5	–	–
Мазут	1,0…1,10	89 C, 7 H	170…330	–	36,4…38,5	–	–	–	–
Пентан C_5H_{12}	0,63	83 C, 17 H	36	352	45,4	285	15,4	1,4	7,8
Гексан C_6H_{14}	0,66	84 C, 16 H	69	331	44,7	240	15,2	1,2	7,4
Н-гептан C_7H_{16}	0,68	84 C, 16 H	98	310	44,4	220	15,2	1,1	6,7
Изооктан C_8H_{18}	0,69	84 C, 16 H	99	297	44,6	410	15,2	1	6
Бензол C_6H_5	0,88	92 C, 8 H	80	394	40,2	550	13,3	1,2	8
Толуол C_7H_8	0,87	91 C, 9 H	110	364	40,6	530	13,4	1,2	7
Ксилол C_8H_{11}	0,88	91 C, 9 H	144	339	40,6	460	13,7	1	7,6
Простой эфир $(C_2H_5)_2O$	0,72	64 C, 14 H, 22 O	35	377	34,3	170	7,7	1,7	36
Ацетон $(CH_3)_2CO$	0,79	62 C, 10 C, 28 O	56	523	28,5	540	9,4	2,5	13
Этанол C_2H_5OH	0,79	52 C, 13 H, 35 O	78	904	26,8	420	9	3,5	15
Метанол CH_3OH	0,79	38 C, 12 H, 50 O	65	1,110	19,7	450	6,4	5,5	26
Рапсовое масло	0,92	78 C, 12 H, 10 O	–	–	38	≈ 300	12,4	–	–
Метилэфиры рапсового масла	0,88	77 C, 12 H, 11 O	320…360	–	36,5	283	12,8	–	–

Вязкость при температуре 20 °C в мм²/с (= сСт): бензин ≈ 0,6; дизельное топливо ≈ 4; этанол ≈ 1,5, метанол ≈ 0,75.

Свойства газообразных топлив и углеводородов

Вид топлива		Плотность при температуре 0°C и давлении 1,013 бар, кг/м³	Состав основных элементов, % по весу	Температура испарения при 1,013 бар, °C	Удельная теплота сгорания		Температура воспламенения, °C	Расчетная потребность воздуха, кг/кг	Содержание горючей смеси	
					топлива, МДж/кг	горючей смеси, МДж/м³			Нижний предел	Верхний предел
									% по объему воздуха	
Сжиженный газ		2,25 [1])	C_3H_8, C_4H_{10}	–30	46,1	3,39	≈ 400	15,5	1,5	15
Бытовой газ		0,56...0,61	50 H, 8 CO, 30 CH_4	–210	≈ 30	≈ 3,25	≈ 560	10	4	40
Природный газ H (Северное море)		0,83	87 CH_4, 8 C_2H_6, 2 C_3H_8, 2 CO_2, 1 N_2	–162 (CH_4)	46,7	–	584	16,1	4,0	15,8
Природный газ H (Россия)		0,73	98 CH_4, 1 C_2H_6, 1 N_2	–162 (CH_4)	49,1	3,4	619	16,9	4,3	16,2
Природный газ L		0,83	83 CH_4, 4 C_2H_6, 1 C_3H_8, 2 CO_2, 10 N_2	–162 (CH_4)	40,3	3,3	≈ 600	14,0	4,6	16,0
Водяной пар		0,71	50 H, 38 CO	–	15,1	3,10	≈ 600	4,3	6	72
Доменный газ		1,28	28 CO, 59 N, 12 CO_2	170	3,20	1,88	≈ 600	0,75	≈ 30	≈ 75
Газ сточных вод [2])		–	46 CH_4, 54 CO_2	–	27,2 [2])	3,22	–	–	–	–
Водород	H_2	0,090	100 H	–253	120,0	2,97	560	34	4	77
Монооксид углерода	CO	1,25	100 CO	–191	10,05	3,48	605	2,5	12,5	75
Метан	CH_4	0,72	75 C, 25 H	–162	50,0	3,22	650	17,2	5	15
Ацетилен	C_2H_2	1,17	93 C, 7 H	–81	48,1	4,38	305	13,25	1,5	80
Этан	C_2H_6	1,36	80 C, 20 H	–88	47,5	–	515	17,3	3	14
Этен	C_2H_4	1,26	86 C, 14 H	–102	14,1	–	425	14,7	2,75	34
Пропан	C_3H_8	2,0 [1])	82 C, 18 H	–43	46,3	3,35	470	15,6	1,9	9,5
Пропен	C_3H_6	1,92	86 C, 14 H	–47	45,8	–	450	14,7	2	11
Бутан	C_4H_{10}	2,7 [1])	83 C, 17 H	–10; +1 [3])	45,6	3,39	365	15,4	1,5	8,5
Бутен	C_4H_8	2,5	86 C, 14 H	–5; +1 [3])	45,2	–	–	14,8	1,7	9
Диметилэфир	C_2H_6O	2,05 [4])	52 C, 13 H, 35 O	–25	28,8	3,43	235	9,0	3,4	18,6

[1]) Плотность сжиженного газа 0,54 кг/л, плотность сжиженного пропана 0,51 кг/л, плотность сжиженного бутана 0,58 кг/л.

[2]) Очищенный газ сточных вод содержит 95% метана (CH_4) и имеет теплоту сгорания 37,7 МДж/кг.

[3]) Первое значение для изобутана, второе - для n-бутана или n-бутена.

[4]) Плотность сжиженного диметилэфира 0,667 кг/л.

Тормозные жидкости и антифризы

Тормозные жидкости

В соответствии с техническими условиями, эти жидкости обеспечивают устойчивую и надежную работу тормозных систем. Технические требования к тормозным жидкостям определяются нормативными документами (стандарты SAE J 1703, FMVSS 116, ISO 4925). Эксплуатационные характеристики тормозных жидкостей содержатся в Федеральных требованиях безопасности автомобильного транспорта в США (FMVSS 116), а также в других национальных нормативных документах. Основные свойства тормозных жидкостей, соответствующие требованиям министерства транспорта США (DOT), приведены в табл. 1

Технические характеристики

Установившаяся температура кипения

Определяет величину сопротивления тормозной жидкости тепловым нагрузкам. Теплота, образующаяся при работе тормозных гидроцилиндров колес (наибольшая температура во всей тормозной системе) является критическим параметром безопасной работы тормозной системы. При температуре, превышающей точку кипения, происходят интенсивное образование воздушных пузырьков испаряющейся тормозной жидкости, что может привести к отказам в работе тормозной системы.

Влажностная точка кипения

Этот параметр характеризует установившуюся температуру кипения тормозной жидкости в зависимости от абсорбируемой влаги (приблизительно 3,5%). Вследствие попадания в тормозную жидкость воды точка кипения снижается. Абсорбция влаги происходит, в основном, за счет диффузии воды через гибкие трубопроводы тормозной системы. Вследствие этого гибкие соединительные трубопроводы заменяются через 1–2 года. На рис. 1 показана зависимость снижения точки кипения двух типов тормозной жидкости от абсорбируемой в ней воды.

Вязкость

Чтобы обеспечить надежную работу тормозной системы в диапазоне температур от –40 до +100 °C, вязкость тормозной жидкости должна оставаться по возможности постоянной с минимальной зависимостью от температуры. Поддержание минимально возможной величины вязкости при очень низких температурах особенно актуально при использовании антиблокировочной системы тормозов (ABS), системы регулирования тягового усилия на колесах (TCS) и системы электронного управления устойчивостью движения (ESP).

Сжимаемость

Тормозная жидкость должна в процессе эксплуатации сохранять низкий уровень сжимаемости и иметь минимальную чувствительность к колебаниям температуры.

Рис. 1. Зависимость температуры кипения тормозной жидкости от влажности

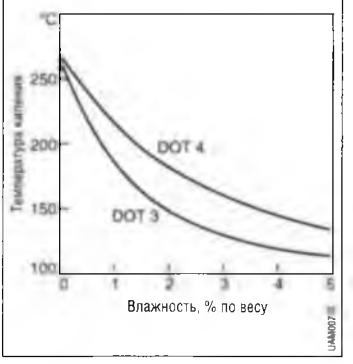


Таблица 1. Характеристики тормозных жидкостей

Нормативные документы	FMVSS 116			ISO 4925
Тип и время действия	DOT3	DOT4	DOT5	Класс 6
Наименьшая установившаяся температура кипения,°C	205	230	260	250
Наименьшая влажностная температура кипения, °C	140	155	180	165
Вязкость при температуре минус 40 °C, мм²/с	<1500	<1800	<900	<750

Защита от коррозии
Стандарт FMVSS 116 регламентирует требования к тормозной жидкости по защите от коррозии: она не должна оказывать корродирующего воздействия на металлические детали тормозной системы. Защитные антикоррозийные свойства обеспечиваются внесением в тормозную жидкость специальных присадок.

Набухание эластомеров
Допускаемая величина набухания эластомеров под воздействием тормозной жидкости не должна превышать 10%. При большей величине набухания прочностные свойства эластомеров существенно снижаются. Даже незначительное загрязнение (минеральным маслом, растворителями) тормозной жидкости на гликолевой основе может привести к разрушению резиновых изделий (таких, как уплотнения) и выходу из строя всей тормозной системы.

Химический состав
Гликоли
Большинство тормозных жидкостей основано на различных соединениях гликолей (двухатомных спиртов). Хотя эти соединения используются для получения тормозных жидкостей, удовлетворяющих требования стандарта DOT3 (табл. 2), их повышенные гигроскопические свойства являются причиной относительно быстрой абсорбции влаги, сопровождающейся снижением температуры кипения тормозной жидкости.

При условии, если свободные ОН-группы (гидроксилы) частично связаны сложными эфирами с борной кислотой, образуется высококачественная тормозная жидкость DOT4 (или «DOT4+», «Super DOT4». DOT5.1), которая, при взаимодействии с влагой, полностью ее нейтрализует. Поскольку снижение температуры кипения тормозной жидкости DOT4 за время ее эксплуатации происходит значительно медленнее по сравнению с жидкостью DOT3, срок ее службы увеличивается.

Стандарт ISO 4925 устанавливает следующий класс качества, а именно «класс 6». Качество жидкостей, удовлетворяющих этому классу, немного лучше, чем DOT4, но при этом класс 6 характеризуется меньшей вязкостью на холоде (табл . 1).

Жидкости на основе минеральных масел (ISO 7308)
Преимуществом тормозных жидкостей, созданных на основе минеральных масел, является отсутствие у них гигроскопичности, поэтому температура кипения (при отсутствии абсорбции влаги) не снижается. Минеральные и синтетические масла для тормозных жидкостей отбираются с особой тщательностью. Для обеспечения как можно меньшей зависимости вязкости от температуры в тормозную жидкость добавляются специальные присадки.

Нефтяная промышленность, помимо топлив, также поставляет для тормозных жидкостей различные присадки, улучшающие их свойства. Следует отметить, что не рекомендуется в тормозные системы, в которых в качестве тормозной жидкости применяются гликоли, добавлять тормозные жидкости, созданные на основе минеральных масел (или наоборот), чтобы не допустить набухания эластомеров.

Силиконовые жидкости (SAE J 1705)
Поскольку силиконовые жидкости, также как и минеральные масла, не абсорбируют влагу, они в ряде случаев успешно применяются в качестве тормозной жидкости. Недостатками сили- коновых жидкостей являются существенно более высокая сжимаемость и худшие смазывающие свойства, что ограничивает их

Таблица 2. Характеристики тормозных жидкостей с различными химическими основами

Классификация / Параметр	DOT3, гликоли	DOT4, гликоли	DOT5.1, Гликоли	DOT5 SB Силиконовые жидкости	Минеральные масла
Наименьшая установившаяся температура кипения, °С	205	230	260		
Наименьшая влажностная температура кипения, °С	140	155	180		
Вязкость при температуре минус 40 °С, мм²/с	<1500		<900		
Дифференциация по цвету	Бесцветный, желтый		Пурпурный		Зеленый

применение в качестве рабочей жидкости во многих гидравлических системах.

К нежелательным последствиям применения силиконовых жидкостей и минеральных масел приводит накопление воды в свободном виде, которая выпаривается при нагреве жидкости свыше 100 °С и замерзает при охлаждении ее ниже 0 °С, с образованием пузырьков, препятствующих нормальной работе системы.

Охлаждающие жидкости

Системы охлаждения предназначены для отбора части теплоты, выделяемой двигателем при сгорании топлива, которая не преобразуется в механическую энергию. Охлаждающая жидкость переносит поглощенное в рубашке цилиндров двигателя тепло в теплообменник (радиатор), где происходит рассеивание тепловой энергии. Циркулирующая в системе охлаждения жидкость подвергается экстремальным тепловым нагрузкам. Кроме того, эта жидкость не должна вызывать коррозию металлических элементов системы.

Благодаря высокой удельной теплоемкости и соответствующему теплопоглощению, вода является отличной охлаждающей жидкостью, хотя и имеет определенные недостатки:

- обладает корродирующими свойствами;
- имеет высокую температуру замерзания (0°С).

Эти недостатки обусловливают необходимость введения в воду соответствующих добавок для обеспечения устойчивой работы системы охлаждения.

Антифризы

Антифризы или водные растворы спиртов, гликолей, глицерина и некоторых неорганических солей, не замерзающие при низких температурах, позволяют понизить температуру замерзания охлаждающей жидкости.

При добавлении в воду растворимых в ней этиленгликолей, она, не замерзая при низких температурах, свободно циркулирует в системе охлаждения двигателя, при этом температура кипения ее повышается (см. табл. 3).

Изготовители автомобилей в инструкциях по эксплуатации рекомендуют разнообразные дополнительные составы охлаждающих жидкостей, не замерзающих при различных температурах окружающего воздуха.

Таблица 3. Характеристика водно-этиленгликолевой охлаждающей жидкости

Содержание гликоля % по объему	Температура образования льдинок °С	Температура кипения °С
10	–4	101
20	–9	102
30	–17	104
40	–26	106
50	–39	108

Присадки

Охлаждающие жидкости должны содержать эффективные присадки для предохранения гликолей от окисления, а также для защиты металлических элементов систем охлаждения от коррозии.

Основные присадки:

- замедлители коррозии (силикаты, нитраты, нитриты, соединения молибдена, производные бензотиазола);
- буферы (бораты);
- антипенные присадки (силиконы).

Пружины

Основные принципы

Функции

Все упругие компоненты, к которым прикладывается нагрузка, являются пружинными элементами. Однако, пружины, в более узком смысле, означают только те упругие элементы, которые могут поглощать, сохранять и выпускать работу на относительно большое расстояние. Сохраненная энергия может также использоваться, для того чтобы поддерживать силу. Самые важные области применения промышленных пружин:

- поглощение и демпфирование амортизаторов;
- хранение потенциальной энергии (пружинные двигатели);
- применение силы (пружины сцепления);
- вибрирующие системы (вибрационный стол);
- измерение силы (пружинные весы).

Характеристики пружин

Характеристики пружин описывают поведение пружины или системы пружин. Это означает определение зависимости нагрузки на пружину или изгибающего момента от деформации. Металлические пружины имеют линейную характеристику (закон Гука), эластомерные пружины – прогрессивную характеристику, тарельчатые пружины – дегрессивную характеристику. Градиент характеристики называют жесткостью пружины.

Для поступательного движения: $R = \frac{dF}{ds}$.

Для вращательного движения: $R_t = \frac{dM_t}{d\alpha}$.

Работа пружины

Для пружин, находящихся под напряжением, при отсутствии трения, область действия пружины представляет поглощенную или выпущенную работу (рис. 1):

$$W = \int F\, ds .$$

Демпфирование пружины

Если присутствует трение, преобладающая нагрузка на пружину больше, чем в случае, когда нагрузка снята. Область действия пружины, описываемая этими двумя характеристиками, представляет работу силы трения WR и является, таким образом, мерой уровня демпфирования (рис. 1):

$$\psi = \frac{W_R}{W}$$

Демпфирование из-за внутреннего трения может быть очень высоким с эластомерными пружинами ($0{,}5 < \psi < 3$). С металлическими пружинами, однако, этот показатель невелик

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
b	Ширина пластинчатой листовой пружины	мм
d	Диаметр проволоки	мм
D	Средний диаметр витка	мм
E	Модуль упругости	МПа
F	Нагрузка на пружину	Н
G	Модуль сдвига	МПа
h	Высота пластинчатой листовой пружины	мм
h_0	Прогиб (тарельчатой пружины)	мм
i	Количество листов (пластинчатой листовой пружины)	–
i_1	Количество листов на концах пластинчатой листовой пружины	–
k	Коэффициент напряжения (корректирующий коэффициент)	–
L_c	Длина пружины с полностью сжатыми витками	мм
l_1	Активная длина	мм
M_b	Момент изгиба	Н·м
M_t	Момент кручения	Н·м
n	Количество активных витков	–
n_t	Полное количество витков	–
R	Жесткость пружины (постоянная пружины)	Н/мм
R_t	Жесткость торсионной пружины	Н м/рад
s	Прогиб пружины	мм
S_a	Минимальное расстояние	мм
t	толщина (тарельчатой пружины)	мм
W	Работа пружины	Дж
W_R	Работа силы трения	Дж
α	Угол закручивания	рад
σ_A	Допустимое переменное напряжение изгиба	МПа
σ_b		МПа
σ_m	Среднее напряжение	МПа
τ_t	Напряжение кручения	МПа
ψ	Уровень демпфирования	–

($0 < \psi < 0{,}4$). Это означает, что у металлических пружин есть известный уровень демпфирования, который достижим только посредством внешнего трения, например, как это происходит в слоях тарельчатых и листовых пружин.

Комбинации пружин

Очень большое разнообразие характеристик пружин может быть достигнуто комбинированием нескольких пружин (рис. 2). В принципе, пружины могут быть объединены параллельно или последовательно. Комбинация параллельных и последовательных пружин также возможна.

Комбинация параллельных пружин

Если пружины действуют параллельно, внешняя нагрузка распределена пропорционально между отдельными пружинами. Однако, прогиб каждой пружины (s) равен прогибу всех пружин. Жесткость системы пружин определяется суммой отдельных показателей жесткости каждой пружины:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n.$$

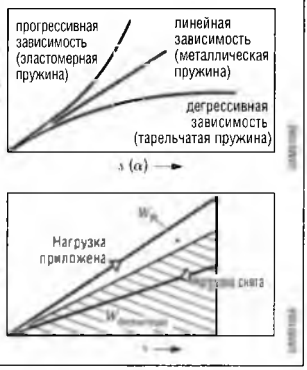
Соответственно, система пружин, включающая параллельные пружины, обладает большей жесткостью, чем отдельные пружины.

Комбинация последовательных пружин

С последовательно расположенными пружинами полная внешняя нагрузка действует на каждую отдельную пружину. Однако, перемещение каждой пружины отличается, в зависимости от отдельных показателей пружин, и суммируется. Система последовательных пружин описывается уравнением:

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}.$$

Рис. 1 Характеристики и работа пружин



Система последовательных пружин является более мягкой, чем самые мягкие отдельные пружины.

Металлические пружины

Обычно металлические пружины классифицируются, согласно их усилиям (табл 2). Надо отметить, что тенденция пружин к релаксации увеличивается с повышением рабочей температуры. Релаксация начинается со 120 °C. Однако, у пружин из нелегированной стали релаксация может наступить при 40 °C. При более высоких рабочих температурах оценить должным образом действие пружин можно только, используя диаграммы зависимости релаксации от напряжения.

Пружины, подвергаемые напряжению сжатия и растяжения

Из-за высокой жесткости, металлические брусы, предназначенные для испытаний на рас-

Рис. 2. Комбинация пружин

Комбинация параллельных пружин 2 и 3 с последовательно расположенной пружиной 1

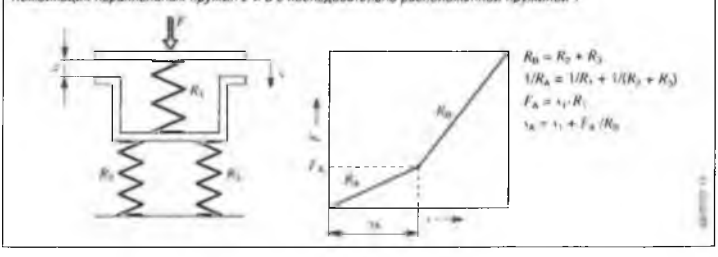


Таблица 2. Нагрузка на пружину

Нагрузка	Конструкция
Растяжение, напряжение при сжатии	Брус для испытаний на растяжение, кольцевая пружина
Напряжение изгиба	Пластинчатая листовая пружина, торсионная пружина, спиральная пружина, тарельчатая пружина
Напряжение кручения	Торсионный стержень, винтовая пружина

тяжение и сжатие, подходят только для очень немногих специальных областей применения.

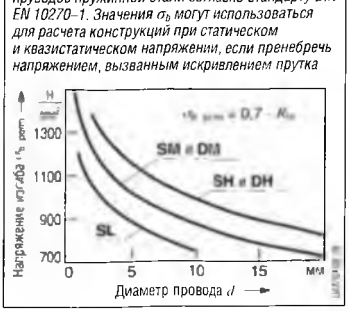
Пластинчатые листовые пружины

Пластинчатые листовые пружины

Таблица 3. Пружины, подвергаемые напряжению изгиба

Сталь	Статическое напряжение $\sigma_{b\ perm}$, МПа	Динамическое напряжение $\sigma_{b\ perm} = \sigma_m \pm \sigma_A$, МПа
Горячекатаная	960	
Холоднокатанная, термически упрочненная	1000	
Однолистовая загрунтованная		500 ± 320
Однолистовая со специальной отделкой поверхности		500 ± 100
Многолистовая со специальной отделкой поверхности		500 ± 80

Рис. 3. Допустимые напряжения изгиба
Торсионные пружины изготавливаются из прутков пружинной стали согласно стандарту DIN EN 10270–1. Значения σ_b могут использоваться для расчета конструкций при статическом и квазистатическом напряжении, если пренебречь напряжением, вызванным искривлением прутка



Простая пластинчатая листовая пружина используется в качестве пружины сжатия или направляющей пружины. Многолистовые пружины используются для подвески колес в автомобилях. Они обычно изготавливаются из пружинной стали в соответствии со стандартом DIN EN 10089 (горячекатаная полоса) и DIN EN 10132 (холоднокатаная полоса). В эскизном проекте могут быть приняты допустимые усилия изгиба, приведенные в табл. 3 и на рис. 3.

Торсионные и спиральные пружины

В случае прогиба торсионных и спиральных пружин, на ось вращения воздействует крутящий момент отдачи. Из-за условий зажима, сгибающие усилия при закручивании на определенный угол почти однородны. Для вычисления торсионных и спиральных пружин используются одни и те же уравнения.

Тарельчатые пружины

Тарельчатые пружины в форме конусообразного кольца (рис. 4), прежде всего, подвергнуты напряжению изгиба. Большое разнообразие применений следует из большого количества параллельных и последовательных комбинаций. Тарельчатые пружины, главным образом, используются там, где нагрузка на пружину и перемещение должны быть поглощены в пределах ограниченного пространства. Они используются, например,

Рис. 4 Тарельчатые пружины, соответствующие стандарту DIN 2093:
a – без контакта на опорную поверхность;
b – с контактом на опорную поверхность;
c – расчетные характеристики тарельчатой пружины в соответствии с DIN 2092



в предохранительных муфтах. Поскольку трение в многодисковых пружинах происходит между отдельными дисками в одном и том же направлении, они также подходят и для демпфирования колебаний и толчков.

При $h_0/t > 0{,}4$ нелинейность пружин становится значительна. Нагрузка на пружину, перемещение и жесткость пружины могут быть вычислены с достаточной точностью согласно DIN 2092 или могут быть взяты по данным изготовителя.

Для тарельчатых пружин, подвергнутых статическому напряжению ($<10^4$ изменений направления действия напряжения), вычисление усталостной прочности не требуется, если максимальная нагрузка на пружину при $s = 0{,}75\ h_0$ не превышена.

Пружины, подвергаемые напряжению кручения

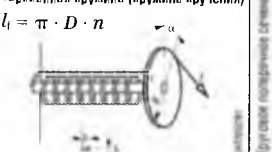
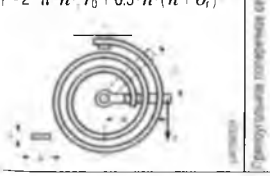
Торсионные стержни

Для торсионов обычно отбираются стержни круглого поперечного сечения. Они обладают фактором использования очень большого объема, что означает, что они могут поглотить много энергии, но при этом занимать мало места.

Винтовые пружины

Цилиндрические винтовые пружины производятся как пружины сжатия и растяжения. Уравнения вычисления характеристик идентичны

Таблица 4. Пластинчатые листовые, торсионные и спиральные пружины

Тип	Нагрузка на пружину	Прогиб
Консольная однолистовая пружина (с постоянным поперечным сечением) 	$F_{max} = \frac{b \cdot h^2}{6 \cdot l} \cdot \sigma_{b,perm}$	$s = \frac{4 \cdot F \cdot l^3}{E \cdot b \cdot h^3}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{F}{s} = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{4 \cdot l^3}$	$W_{max} = \frac{\sigma_{b,perm}^2}{18 \cdot E} \cdot b \cdot h \cdot l$
Многолистовая пружина 	Нагрузка на пружину, крутящий момент	Прогиб
	$F_{max} = \frac{i \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l} \cdot \sigma_{b,perm}$	$s = \frac{12 \cdot F \cdot l^3}{(2 \cdot i + i') \cdot E \cdot b \cdot h^3}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{(2i + i') \cdot E \cdot h^3 \cdot b}{12 \cdot l^3}$	$W_{max} = \frac{\sigma_{b,perm}^2}{3 \cdot E} \cdot \frac{F}{(2i + i')} \cdot b \cdot h \cdot l$
Торсионная пружина (пружина кручения) $l_f = \pi \cdot D \cdot n$ 	Нагрузка на пружину, крутящий момент	Прогиб
Круглое поперечное сечение	$M_{t,max} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot \sigma_{b,perm}$	$\alpha = \frac{64 \cdot M_t \cdot l}{E \cdot \pi \cdot d^4}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{M_t}{\alpha} = \frac{E \cdot \pi \cdot d^4}{64 \cdot l}$	$W_{max} = \frac{\sigma_{b,perm}^2}{32 \cdot E} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l$
Спиральная пруужина $l_f = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r_0 + 0{,}5 \cdot n \cdot (h + \delta_t)$ 	Нагрузка на пружину, крутящий момент	Прогиб
Прямоугольное поперечное сечение	$M_{t,max} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \sigma_{b,perm}$	$\alpha = \frac{12 \cdot M_t \cdot l}{E \cdot b \cdot h^3}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{M_t}{\alpha} = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot l}$	$W_{max} = \frac{\sigma_{b,perm}^2}{6 \cdot E} \cdot b \cdot h \cdot l$

для обоих типов пружин. Пружины сжатия конической формы позволяют оптимизировать использование пространства, если отдельные пружины могут быть вставлены друг в друга.

Эксцентриситет силы может быть минимизирован на пружинах сжатия, если пружину наматывать так, чтобы концы проводов на каждом конце пружины коснулись смежного витка. Каждый конец пружины в виде плоской поверхности основания перпендикулярен оси пружины. Чтобы избежать перегрузки пружины, должно поддерживаться минимальное расстояние между активными витками. Для статических напряжений применяются данные, приведенные в табл. 6. Для расчета динамического напряжения расстояние Sa должно быть удвоено. Дополнительно концы пружин должны располагаться на 180 ° друг к другу. Общее количество витков всегда должно быть кратно половине витка (например, n_t = 7,5). Эффект искрив-

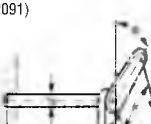
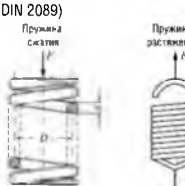
Таблица 6. Винтовые пружины

	Полное число витков	Длина полностью сжатых витков пружины	Сумма минимальных расстояний
Холоднокатаная сталь	$n_t = n + 2$	$L_c \le n_t \cdot d$	$S_a = (0.0015 \cdot D^2/d + 0.1 \cdot d) \cdot n$
Горячекатаная сталь	$n_t = n + 1.5$	$L_c \le (n_t - 0.3) \cdot d$	$S_a = 0.02 \cdot (D + d) \cdot n$

Таблица 7. k-фактор

D/d	3	4	6	8	10	14	20
k	1,55	1,38	1,24	1,17	1,13	1,10	1,07

Таблица 5. Торсионный стержень и винтовая пружина

Тип	Нагрузка на пружину	Прогиб
Торсионный стержень с круглым поперечным сечением (DIN 2091) 	$M_{t,\max} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \cdot \tau_{t,perm}$	$\alpha = \frac{32 \cdot M_t \cdot l}{G \cdot \pi \cdot d^4}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{M_t}{\alpha} = \frac{G \cdot \pi \cdot d^4}{32 \cdot l}$	$W_{max} = \frac{\tau_{t,perm}^2}{16 \cdot G} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l$
Цилиндрические винтовые пружины с круглым поперечным сечением (DIN 2089) 	Нагрузка на пружину, крутящий момент	Прогиб
	$F_{max} = \frac{\pi \cdot d^3}{8 \cdot k \cdot D} \cdot \tau_{t,perm}$	$s = \frac{8 \cdot D^3 \cdot n}{G \cdot d^4} \cdot F$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n}$	$W_{max} = \frac{\tau_{t,perm}^2}{16 \cdot G} \cdot d^2 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot n$
Коническая винтовая пружина с круглым поперечным сечением 	Нагрузка на пружину, крутящий момент	Прогиб
	$F_{max} = \frac{\pi \cdot d^3}{16 \cdot k \cdot r_2} \cdot \tau_{t,perm}$	$s = \frac{16 \cdot (r_1 + r_2) \cdot (r_1^2 + r_2^2) \cdot n \cdot F}{G \cdot d^4}$
	Жесткость пружины	Работа пружины
	$R = \frac{G \cdot d^4}{16 (r_1 + r_2) \cdot (r_1^2 + r_2^2) \cdot n}$	$W_{max} = \frac{\tau_{t,perm}^2}{32 \cdot G} \cdot \frac{d^2 (r_1 + r_2) \cdot (r_1^2 + r_2^2) \cdot \pi \cdot n}{r_2^2}$

ления провода учитывается коэффициентом напряжения k (табл. 7).

В случае статического напряжения этот эффект может быть проигнорирован, тогда, например, принимается $k = 1$. Следующее соотношение относится к диапазону напряжений, преобладающему в случае динамического напряжения:

$$\tau_{zh} = k \frac{8}{\pi} \frac{D}{d^3} \cdot (F_2 - F_1) \leq \tau_{kH}$$

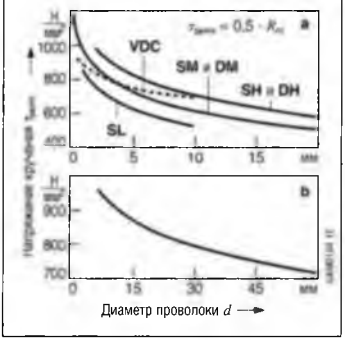
Пружины растяжения

Пружины растяжения выпускаются с петлями либо с закатанными, либо поджатыми концами. Так как срок службы определен прежде всего петлями, невозможно дать общие предельные значения усталости. Пружины растяжения, получаемые холодной штамповкой, после упрочнения и отпуска производятся с внутренней предварительной нагрузкой. Это позволяет выдерживать значительно более высокие нагрузки на пружину.

Рис. 6. Допустимые напряжения кручения для винтовых пружин со статическим напряжением

a – для пружин, получаемых холодной штамповкой проволоки, изготовленной из пружинных сталей (SL, SM, DM, SH и DH) и из стали для клапанных пружин (VDC), согласно стандарту DIN EN 10270–2;

b – для пружин, получаемых горячей штамповкой проволоки, изготовленной из пружинных сталей, согласно стандарту DIN EN 10089



Список литературы

[1] DIN-Taschenbuch 29: Federn (Springs). Beuth-Verlag 2003.

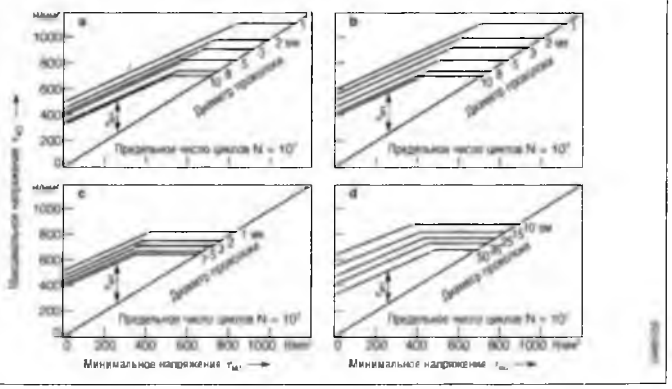
[2] Haberhauer/Bodenstein: Maschinenelemente. 15th Edition, Springer-Verlag 2008.

[3] Fischer/Vondracek: Warm geformte Federn. Hoesch Hohenlimburg AG, 1987.

[4] Meissner/Schorcht: Metallfedern. Springer-Verlag 1997.

Рис. 5. Графики пределов усталости для винтовых пружин сжатия

a – для пружин, получаемых холодной штамповкой проволоки, изготовленной из пружинной стали SH и DH (без дробеструйной обработки), b – для пружин, получаемых холодной штамповкой проволоки, изготовленной из пружинной стали SH и DH (с дробеструйной обработкой); c – для пружин, получаемых холодной штамповкой проволоки, изготовленной из стали для клапанных пружин (VDC), d – для пружин, получаемых горячей штамповкой



Подшипники скольжения

Характеристики

Подшипники скольжения (также называемые фрикционными подшипниками) служат для восприятия и передачи усилий между компонентами, перемещающимися относительно друг друга. Эти подшипники определяют положение компонентов по отношению к друг другу и обеспечивают точность их положения во время движения. Они также используются в механизмах преобразования линейного движения во вращательное (например, в поршневых двигателях).

Существуют следующие типы подшипников скольжения, имеющих соответствующий техническим требованиям срок службы: гидродинамические подшипники, в которых трущиеся поверхности разделены смазывающей пленкой (жидкостное трение); самосмазывающиеся подшипники, в большинстве которых используется смешанное трение (часть опорной нагрузки передается посредством контакта между трущимися поверхностями); подшипники сухого трения (т. е. при отсутствии жидкой смазывающей пленки).

Таблица 1. Символы и единицы измерения (DIN 31652)

Величина	Обозначение	Единица измерения
Осевая длина подшипника	b	м
Внутренний диаметр подшипника (номинальный диаметр)	D	м
Диаметр шейки вала (номинал)	d	м
Эксцентриситет (смещение между центрами шейки вала и подшипника)	e	м
Усилие (нагрузка)	F	Н
Минимальная толщина пленки смазочного материала	h_0	м
Локальное давление пленки смазочного материала	p	Па = Н/м^2
Удельная нагрузка подшипника $\bar{p} = F/(B\,D)$	$\bar{p}$	Па
Зазор подшипника $s = (D - d)$	s	м
Число Зоммерфельда	So	-
Относительный эксцентриситет $2\,e/s$	ε	-
Эффективная динамическая вязкость смазочного материала	$\eta_{эф}$	Па с
Относительный зазор подшипника $\psi = s/D$	ψ	-
Угловое смещение	β	-
Эффективная гидродинамическая угловая скорость вращения	$\omega_{эф}$	с$^{-1}$

Гидродинамические подшипники скольжения

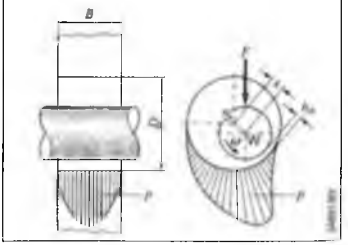
Большинство гидродинамических подшипников, используемых в автомобилях, являются радиальными подшипниками скольжения (рис. 1), которые в основном применяются в качестве подшипников коленчатых и распределительных валов. Обычно подшипники представляют собой вкладыши с зазором специальной формы (например, овальным зазором). В качестве компонентов, базирующихся в осевом направлении, используются упорные подшипники, которые как правило, радиальных нагрузок не испытывают.

Гидродинамические подшипники скольжения надежны в работе, если они не подвергаются чрезмерным:

- износу (отсутствие износа обеспечивается надежным разделением движущихся поверхностей слоем смазки);
- механическим напряжениям (материал подшипника должен обладать достаточной прочностью);
- термическим нагрузкам (при сохранении тепловой устойчивости материала и при расчетном вязкостно-температурном режиме смазки).

Для надежной работы гидродинамического подшипника скольжения, необходимо обеспечить наличие несущей нагрузку пленки смазочного масла в широком рабочем диапазоне. Эта пленка создается в радиальном подшипнике, когда вал расположен эксцентрично. Это, в свою очередь, создает давление смазочного материала.

Рис. 1. Распределение давления в радиальном подшипнике скольжения
e – эксцентриситет,
F – усилие нагрузки;
h_0 – минимальная толщина смазочной пленки;
p – распределение давления;
ω – угловая скорость вращения,
S – центр вкладыша (подшипника);
W – центр шейки вала.



Вращающийся вал подает смазку в зазор. Эксцентриситет в пределах системы «шейка вала–вкладыш» выбран таким образом, что общее давление смазочного материала под действием внешнего усилия поддерживается в состоянии равновесия. Распределение гидродинамического давления в сходящемся зазоре подшипника определяется из решения дифференциального уравнения Рейнольдса.

Нагрузочная способность смазочной пленки определяется посредством интегрирования распределения давления и выражается безразмерным числом Зоммерфельда So:

$$So = \frac{F \psi^2}{(D\,B\,\eta_{ef}\,\omega_{en})}$$

При увеличении числа Зоммерфельда So увеличивается относительный эксцентриситет, а минимальная толщина пленки смазки h_o уменьшается. При этом применимо следующее выражение:

$$h_o = \frac{(D-d)}{2} - e = 0{,}5\,D\,\psi\,(1-e)\,.$$

Относительный эксцентриситет равен:

$$\varepsilon = \frac{2e}{(D-d)}\,.$$

Число Зоммерфельда используется также для определения коэффициента трения в подшипнике и оценки на его основе мощности трения и термических напряжений (DIN 31652, директива VDI 2204).

Режимы трения в гидродинамическом подшипнике скольжения можно пояснить при помощи кривой Герси-Штрибека (см. рис. 2). Имеются три различных режима трения:

- сухое трение;
- смешанное трение;
- жидкостное трение.

Приведенные в табл. 2 коэффициенты трения имеют приблизительное значение и могут использоваться только для сравнения различных видов трения.

Поскольку гидродинамические подшипники некоторое время работают при смешанном трении, они сохраняют свои функциональные возможности при среднем объеме загрязнения и высоких динамических и термических нагрузках (особенно в поршневых двигателях). Материал подшипников должен отвечать ряду требований, порой противоречащих друг другу. К ним относятся:

Таблица 2. Коэффициент трения для различных видов трения

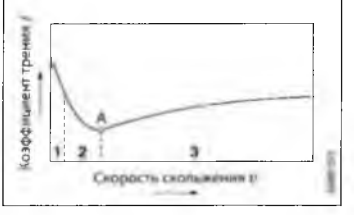
Тип трения	Коэффициент трения f
Сухое трение	0,1 – >1
Смешанное трение	0,01 – 0,1
Жидкостное трение	0,01
Трение скольжения и качения в роликовых подшипниках	0,001

Таблица 3. Эмпирические величины максимальной удельной нагрузки подшипников

Материалы подшипников	Макс. допустимая удельная нагрузка на подшипник p_{lim}
Сплавы Pb и Sn (баббиты)	5 – 15 Н/мм^2
Свинцовистая бронза	7 – 20 Н/мм^2
Оловянистая бронза	7 – 25 Н/мм^2
Сплавы AlSn	7 – 18 Н/мм^2
Сплавы AlZn	7 – 20 Н/мм^2
Наибольшие величины нагрузки применимы только для низкой скорости скольжения	

- приспособляемость (компенсация несоосности за счет пластической деформации без сокращения срока службы);
- смачиваемость пленкой жидкости;
- абсорбирующая способность (способность опорной поверхности абсорбировать частицы грязи без увеличения износа вала и вкладышей подшипника);
- износостойкость (при смешанном трении);
- сопротивление задирам (материал подшипника не должен схватываться с мате-

Рис. 2: Кривая Герси-Штрибека (диаграмма):
1 – сухое трение; 2 – смешанное трение;
3 – жидкостное трение;
A – точка перехода;
f – коэффициент трения = Сила трения / Нормальная сила
υ – скорость скольжения



риалом вала даже при высоких скоростях и давлениях);
- противозадирные характеристики (стойкость к износу);
- приработка в эксплуатации (комплексная оценка, включающая приспособляемость, износостойкость, абсорбирующую способность);
- механическая прочность;
- выносливость (усталостная прочность, особенно в условиях высоких термических нагрузок).

Если подшипники (например, поршневых пальцев) работают в условиях высоких нагрузок и низких скоростей скольжения, определяющее значение приобретают высокая усталостная прочность и износостойкость по сравнению с сопротивлением задирам. Материалами, используемыми в подшипниках в таких случаях, являются твердые бронзы или специальные латунные сплавы.

Коренные и шатунные подшипники коленчатого вала в двигателях внутреннего сгорания работают в условиях высоких скоростей и динамических нагрузок. Поэтому в них применяют многослойные вкладыши (рис. 3), в том числе хорошо зарекомендовавшие себя триметаллические.

Срок службы подшипников скольжения в системах привода коленчатых и распределительных валов может быть увеличен посредством использования специальных технических решений, таких как подшипники с напылением или подшипники скольжения с канавками для смазки. Подшипники с напыленным слоем (рис. 4) имеют рабочий слой материала AlSn, отличающегося высокой износостойкостью и наносимого посредством процесса PVD (физическое осаждение паров) на нижележащий высокопрочный материал.

Подшипники скольжения с канавками для смазки (рис. 5) демонстрируют определенные преимущества в некоторых областях применения. В этих подшипниках окружные канавки в рабочей поверхности заполнены слоем мягкого материала (гальванический слой, аналогичный слою, имеющемуся в триметаллических подшипниках)

Вышеупомянутые подшипники с успехом применяются в двигателях внутреннего сгорания с максимальными рабочими нагрузками (например, в двигателях с турбонаддувом, в которых имеют место очень высокие рабочие давления).

Рис. 3. Многослойные подшипники
Конструктивная схема триметаллических подшипников:
1 – стальная подложка; 2 – подшипниковый металл; 3 – диффузионный барьер (например, слой никеля толщиной 1 – 2 мкм); 4 – проникающее покрытие (прибл. 20 мкм, слой электролитического покрытия SnCu или антифрикционный слой



Рис. 4. Подшипник с напыленным слоем (не содержащим свинца) в разрезе:
1 – стальная основа;
2 – слой латуни CuZn 20 AlNi;
3 – рабочий слой (напыленный слой) AlSn 20 Cu



Рис. 5. Подшипник с канавками на поверхности трения *(патент MIBA). Рабочая поверхность с очень мелкими канавками, располагаемыми в направлении вращения V_G:*
1 – износостойкий слой из легкого сплава;
2 – вставка из мягкого металла, 3 – никелевая перегородка



Таблица 4 Материалы для гидродинамических радиальных подшипников скольжения

Материал	Обозначение сплава	Состав в %	Твёрдость по Бринеллю 20 °C	100 °C	Замечания, примеры применения
Оловянистый баббит	LgPbSn 80 (WM 80)	80 Sn; 12 Sb; 6 Cu; 2 Pb	27	10	Очень мягкий, хорошее прилегание контактных поверхностей в условиях смещенных осей, очень хорошие антизадирные свойства.
Свинцовистый баббит	LgPbSn 10 (WM 10)	73 Pb; 16 Sb; 10 Sn; 1 Cu	23	9	Требуется упрочнение, например, композитное стальное литье или промежуточный слой никеля на свинцовистой бронзе
Свинцовистая бронза	G-CuPb 25	74 Cu; 25 Pb; 1 Sn	50	47	Очень мягкий, очень хорошие антизадирные свойства, в меньшей степени стоек к износу
	G-CuPb 22	70 Cu, 22 Pb; 6 Sn; 3 Ni	86	79	
Свинцовисто-оловянистая бронза	G-CuPb 10 Sn	80 Cu; 10 Pb; 10 Sn	75	67	Улучшенные антизадирные свойства за счет наличия в составе сплава свинца. Более стойкий материал при работе с осевым смещением, чем чистая оловянистая бронза, поэтому для узлов коленчатых валов предпочтительно применение Pb-Sn бронз с высокой нагрузочной способностью Композитные подшипники в двигателях внутреннего сгорания, втулки поршневых пальцев p до 100 Н/мм^2.
	G-CuPb 23 Sn	76 Cu; 23 Pb; 1 Sn	55	53	Композитное литье для подшипников низкой нагрузочной способности (70 Н/мм^2) Также толстостенные вкладыши подшипников. Очень хорошие антизадирные свойства. Подшипники коленчатых и распределительных валов Шатунные подшипники
Оловянистая бронза	G-CuSn 10 Zn	88 Cu; 10 Sn; 2 Zn	85		Твердый материал Подшипник скольжения может подвергаться умеренным нагрузками при низких скоростях скольжения Червячные передачи.
	CuSn 8	92 Cu; 8 Sn	80 220		Высококачественный деформируемый сплав Хорошо работает при высоких нагрузках и при недостаточной смазке, может применяться в подшипниках механизмов рулевого управления Особенно хорошо подходит для использования в тонкостенных втулках подшипников скольжения
	CuSn 6 Ni 6	88 Cu; 6 Sn, 6 Ni	230		Хорошая коррозионная стойкость, высокая износостойкость, допустимая нагрузка до 200 Н/мм^2, катаные втулки малых головок шатунов
Красная латунь	G-CuSn 7 ZnPb	83 Cu, 6 Pb, 7 Sn; 4 Zn	75	65	Олово частично заменено цинком и свинцом Может использоваться вместо оловянистой бронзы, но только при умеренных нагрузках (40 Н/мм^2) Подшипники скольжения общего назначения для машинного оборудования Поршневые пальцы, втулки, подшипники коленчатого вала и подшипники шарнирных соединений

Таблица 4. Материалы для гидродинамических радиальных подшипников скольжения (продолжение)

Материал	Обозначение сплава	Состав в %	Твердость по Бринеллю 20 °C 100 °C	Замечания, примеры применения
Латунь	CuZn 31 Si	68 Cu; 31 Zn; 1 Si	90... 200	Присутствие олова неблагоприятно при работе в условиях высоких температур. Может использоваться вместо оловянистой бронзы при низких нагрузках.
	CuZn 23 Al 5 [3]	64 Cu; 23 Zn; 5 Al; 3 Mn; 3 Fe; 2 Ni	180	Высокая статическая и динамическая нагрузочная способность. Постоянное поверхностное давление до 200 Н/мм^2, упорные шайбы, втулки поршневых пальцев
	CuZn 20 AlMnNi [4]	74 Cu; 20 Zn; 2 Al; 2 Mn; 2 Ni	120... 180	Композитное стальное литье, очень хорошая коррозионная стойкость, допустимая нагрузка до 180 Н/мм^2, катаные втулки малых головок шатунов В сочетании с напыленным слоем (AlSn 20) может применяться в шатунных подшипниках двигателей с турбонаддувом.
Алюминиевая бронза	CuAl 9 Mn	88 Cu; 9 Al; 3 Mn	110... 190	Тепловое расширение сравнимо с расширением легких сплавов, материал пригоден для использования в подшипниках, устанавливаемых с посадкой с натягом в корпусах из легких сплавов Лучшая износостойкость, чем у оловянистой бронзы, но более высокий коэффициент трения.
Алюминиевый сплав	AlSi 12 Cu NiMn	1 Cu; 85 Al; 12 Si; 1 Ni; 1 Mn	110 100	Поршневой сплав для низких скоростей качения.
Накатанное алюминиевое покрытие	AlSn 6	1 Cu; 6 Sn; 90 Al; 3 Si	40 30	Оловянное покрытие, растянутое накаткой, имеет высокую нагрузочную способность и антифрикционные свойства Характеристики могут быть улучшены посредством гальванического покрытия.
	AlSn 10 Ni [5]	86 Al; 10 Sn; 2 Ni; 1 Mn; 1 Cu	50... 70	Композитное накатанное покрытие, может использоваться в двухкомпонентных подшипниках, высокая нагрузочная способность, очень высокая коррозионная стойкость, подшипники коленчатого вала и шатунные подшипники
	AlZn 5 Bi [6]	89 Al; 5 Zn, 3 Bi; 2 Si; 1 Cu	60... 100	Композитное накатанное покрытие, для двухкомпонентных подшипников. Допустимая нагрузка – до 90 Н/мм^2, высокая износостойкость, коренные и шатунные подшипники.
Слои электролитического покрытия	PbSn 10 Cu	2 Cu; 88 Pb; 10 Sn	15. .20 HV	Для современных триметаллических подшипников, толщина от 10 до 34 мкм, электролитическое покрытие, очень мелкозернистая структура Промежуточный слой никеля на подшипниковом металле
	SnCu 6 [7]	94 Sn; 6 Cu	15 20 HV	Высокая нагрузочная способность в сочетании с промежуточным слоем SnNi на подшипниковом металле, подшипники коленчатого вала и шатунные подшипники.

Таблица 4. Материалы для гидродинамических радиальных подшипников скольжения (продолжение)

Материал	Обозначение сплава	Состав в %	Твердость по Бриннелю/ Виккерсу 20 °C 100 °C	Замечания, примеры применения
Антифрикционные слои [8]		70 PAI, 20 MoS_2; 10 Графит	25...30 HV	Хорошие антизадирные свойства, высокая износостойкость. Допустимая нагрузка до 80 Н/мм^2, подшипники коленчатого вала и шатунные подшипники.
Напыленные слои	AlSn 20 Cu	79 Al, 20 Sn; 1 Cu,	85...110 HV	Осажденные на подшипниковом металле посредством процесса PVD, толщина слоя 8–16 мм, очень высокая износостойкость. Допустимая нагрузка – до 120 Н/мм^2 Для шатунных подшипников, испытывающих высокие нагрузки
Данные по материалам см. также в: DIN 1703, 1705, 1716, 17660, 17662, 17665, 1494, 1725, 1743. ISO 4381, 4382, 4383.				
Важное замечание. некоторые из сплавов, указанных в табл. 4, содержат свинец. Директивой ЕС 2000/53/ЕС применение свинца в легковых автомобилях, начиная с середины 2008 года запрещено. Применение свинца пока что разрешено в коммерческих автомобилях Также применимо для машиностроения вообще.				
[1, 4, 6] Материалы KS для подшипников качения; [2] Материал производства компании Wieland; [3] Материал производства компании Bogra; [5, 7] Материалы производства компании Federal Mogul; [8] Антифрикционный слой производства компании Miba.				

Металлокерамические подшипники скольжения

Изготавливаются из пористых, пропитанных жидкой смазкой металлокерамических материалов. Такие подшипники применяются во многих небольших электродвигателях. Они представляют собой хороший компромисс между точностью и легкостью монтажа, не требуют обслуживания при эксплуатации, у них невысокая стоимость и большой срок службы; обычно используются в электродвигателях с диаметром вала от 1,5 до 12 мм. Стоимость подшипников из железной и стальной металлокерамики невысока, они меньше окисляют смазку, поэтому применение их в автомобилях предпочтительнее, чем использование подшипников из бронзовой металлокерамики (см. табл. 5). Достоинствами подшипников из бронзовой металлокерамики являются большая нагрузочная способность, меньшие уровень шума и коэффициент трения. Они используются в аудиоаппаратуре, оборудовании систем информации и управления, а также в фотоаппаратах.

Таблица 5. Материалы для металлокерамических подшипников

Группа материалов	Обозначение Sint- ..	Состав	Примечания
Спеченный сплав на основе железа	B 00	Fe	Стандартный материал, отвечающий требованиям для умеренных нагрузок и уровня шума
Спеченная сталь, содержащая медь	B 10	<0,3 C, 1–5 Cu, остальное Fe	Высокая износостойкость, более высокая нагрузочная способность, чем у чистого железа
Спеченная сталь с более высоким содержанием меди	B 20	20 Cu, остальное Fe	Дешевле, чем спеченная бронза, хорошие шумовые характеристики и значения $p \cdot v$
Спеченная бронза	B 50	<0,2 C, 9–10 Sn, остальное Cu	Стандартный материал на основе Cu-Sn, хорошие шумовые характеристики
Материалы Sint-B имеют пористость 20 %, (Sint-A 25 % P, Sint-C 15 % P)			

Металлокерамические подшипники имеют длительный срок службы при условии применения оптимальных видов смазки.

Минеральные масла: недостаточно хорошие низкотемпературные свойства, умеренное старение.

Синтетические масла (эфиры, поли-α – олефины): обладают хорошей текучестью на холоде, высоким сопротивлением тепловым нагрузкам, низкой испаряемостью.

Синтетические масла (масла, загущенные мылами щелочных металлов): обеспечивают низкое начальное трение, малый износ.

Подшипники со скользящим контактом

Полимерные подшипники из термопластичных смол

Преимущества:
- невысокая цена;
- отсутствие опасности образования задиров.

Недостатки:
- низкая теплопроводность;
- относительно низкие рабочие температуры;
- возможное разбухание в условиях высокой влажности;
- низкая нагрузочная способность;
- высокий коэффициент теплового расширения.

Наиболее часто применяемые синтетические материалы:
- полиоксиметилен (POM, POM-C);
- полиамид (PA);
- полиэтилен и полибутилентерефталат (PET, PBT);
- полиэфирэфиркетон (PEEK).

Трибологические и механические свойства могут изменяться в широких пределах в зависимости от применяемых смазок и упрочнения базового термопластика.

Присадки к смазочным материалам:
- политетрафторэтилен (PTFE);
- графит (C);
- силиконовое масло и другие жидкие смазочные материалы, с недавнего времени также заключаемые в микрокапсулы.

Упрочняющие добавки:
- стекловолокно (GF);
- углеродное волокно (CF).

Примеры применения:
- подшипники механизма стеклоочистителя (PA и стекловолокно);
- регуляторы оборотов холостого хода (PEEK + углеродное волокно, PTFE и иные добавки).

Рис. 6. Сечение самосмазывающегося композитного подшипника
1 – синтетическая накладка; 2 – слой бронзовой керамики; 3 – медная прослойка; 4 – металлическая основа. 5 – слой олова

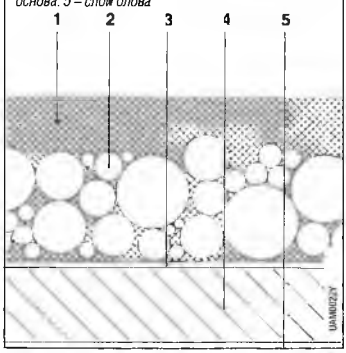
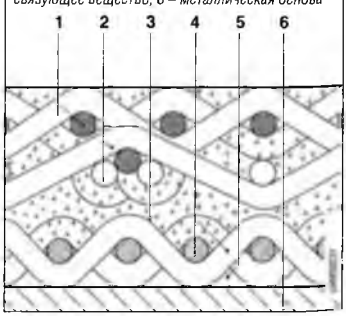


Рис. 7. Поперечное сечение композитного подшипника с металлической основой и упрочняющими волокнистыми вставками из PTFE и стекловолокна:
1 – тканое волокно PTFE; 2 – связующие волокна; 3 – смола; 4 – стекловолокнистая набивка; 5 – связующее вещество, 6 – металлическая основа



Подшипники из полимерных смол и эластомеров
Эти материалы с высоким внутренним трением редко используются для подшипников автомобилей. К полимерным смолам относятся
- фенольные (с высоким внутренним трением, например, Resitex).
- Эпоксидные смолы (требуют добавки PTFE или C, упрочнение волокнными материалами требуется вследствие присущей им хрупкости)
- Полиимиды (высокая температурная стойкость и механическая прочность)

Пример применения:
- полиимидные осевые ограничители вала электродвигателя стеклоочистителя.

Композитные подшипники с металлической основой
Представляют собой соединение синтетических материалов, искусственных волокнистых материалов и металлов. По сравнению с полностью синтетическими подшипниками или подшипниками с упрочняющими заполнителями (рис. 6 и 7), имеют более высокие уровень восприятия нагрузок, допустимые зазоры, теплопроводность, стойкость к колебаниям и вибрации.

Пример применения:
- на покрытую слоем гальванического олова или меди стальную основу (толщиной несколько мм) наносится слой бронзовой металлокерамики толщиной 0,2–0,35 мм и пористостью 30–40 %. Поверх нее накатывается синтетическое покрытие с низким трением, Покрытие состоит из:
  a) полиформальдегида или поливинилиденфторида, пропитанного маслом или содержащего смазочные выемки, или
  b) PTFE + ZnS или MoS_2 или графита в качестве присадки

Композитные подшипники с металлической основой выпускаются в самых различных формах и составах. При добавлении PTFE композитные подшипники с металлической основой обладают очень высокой нагрузочной и демпфирующей способностью.

Примеры применения в автомобилях
- подшипники поршневых штоков в стойках подвески;
- выжимные подшипники сцепления;
- подшипники тормозных колодок в барабанных тормозах,
- подшипники шаровых опор;
- подшипники дверных петель;
- подшипники в натяжителях ремней безопасности;
- подшипники в шарнирах рулевого управления;
- подшипники шестеренчатых насосов.

Для использования в топливных насосах высокого давления дизельных двигателей требуются композитные подшипники со специально модифицированным покрытием. Покрытие состоит из PEEK или PPS с добавками (например, углеволокно, ZnS, TiO_2 и графит). Размер частиц иногда лежит в нанодиапазоне.

Углеграфитные подшипники
Углеграфитные подшипники по способу изготовления и свойствам конструкционного материала относятся к классу керамических. Основными материалами для них служат порошковый графит и каменноугольная или синтетическая смола, используемая в качестве связующего вещества.

Преимущества:
- термостойкость до 350 °C (твердообожженный графит), до 500 °C (электрографит);
- хорошие антифрикционные свойства;
- хорошая коррозионная стойкость;
- хорошая теплопроводность;
- высокая стойкость к тепловым ударам. В то же время к их недостаткам относится высокая хрупкость.

Примеры применения углеграфитных подшипников:
- подшипники для топливного насоса;
- подшипники в сушильных печах;
- регулируемые лопатки в турбонагнетателях.

Металлокерамические подшипники
Металлокерамические подшипники состоят из материалов, получаемых методом порошковой металлургии. В дополнение к металлической матрице материал подшипников содержит равномерно распределенные мелкозернистые частицы твердой смазки.

Матрица: например, бронза, железо, никель.
Смазка: например, графит, MoS_2.

Эти материалы пригодны для очень высоконагруженных подшипников; кроме того, они могут работать в режиме самосмазывания.

Пример применения:
- подшипники в шарнирах рулевого управления.

Таблица 6. Свойства необслуживаемых самосмазывающихся подшипников

Параметр	Металлокерамические подшипники, пропитанные маслом		Полимерные подшипники		Композитные подшипники с металлической основой. Рабочий слой		Синтетические графиты
	Спеченный сплав на основе железа	Спеченная бронза	Термопластичный полиамид	Дуропласт-полиимид	PTFE + добавка	Ацетальная смола	
Напряжение сжатия Н/мм^2	80 –180		70	110	250	250	100–200
Макс скорость скольжения, м/с	10	20	2	8	2	3	10
Типовая нагрузка, Н/мм^2	1– 4 (10)		15	50 (при температуре 50 °С) 10 (при температуре 200 °С)	20–50	20–50	50
Допустимая рабочая температура, °С	– 60 –180 (зависит от используемого масла)		–130 – 100	–100–250	–200–280	–40–100	–200–350
краткосрочная	200		120	300		130	500
Коэффициент трения без смазки	со смазкой 0,04–0,2		0,2–0,4 (100 °С) 0,4–0,6 (25 °С)	0,2–0,5 (пустой) 0,1–0,4 (заполненный)	0,4–0,2	0,7[1]– 0,2 [1] заполненный PTFE	0,1– 0,35
Теплопроводность, Вт/(м · К)	20–40		0,3	0,4–1	46	2	10–65
Коррозионная стойкость	менее хорошая	хорошая	очень хорошая		хорошая	хорошая	очень хорошая
Химическая стойкость	Нет		очень хорошая		условная	условная	хорошая
Макс. $p \cdot v$ (Н/мм^2) · (м/с)	20		0,05	0,2	1,5– 2		0,4–1,8
Стойкость к вдавливанию частиц грязи и стертых материалов	менее хорошая		хорошая	хорошая	менее хорошая	хорошая	менее хорошая

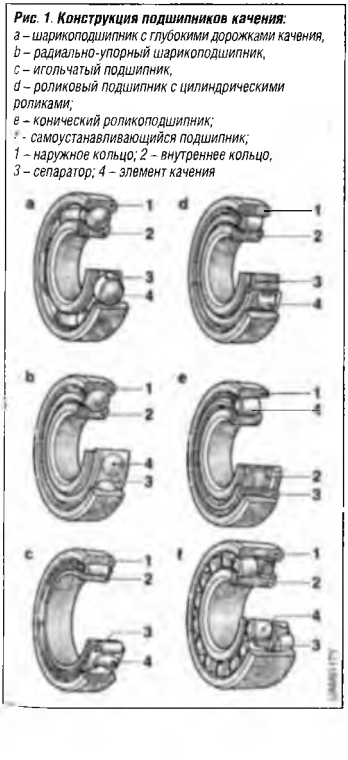
Подшипники качения

Применение

Подшипники качения являются одними из наиболее важных компонентов машин. К ним предъявляются высокие требования в отношении нагрузочной способности и эксплуатационной надежности.

Подшипники качения широко применяются в автомобилях, например, в качестве подшипников генераторов и стартеров, ступичных подшипников, подшипников стоек подвески, трансмиссий, карданных валов, насосов систем охлаждения, натяжных роликов, систем рулевого управления, двигателей стеклоочистителей, вентиляторов и топливных насосов.

Рис. 1. Конструкция подшипников качения:
a – шарикоподшипник с глубокими дорожками качения,
b – радиально-упорный шарикоподшипник,
c – игольчатый подшипник,
d – роликовый подшипник с цилиндрическими роликами;
e – конический роликоподшипник;
f – самоустанавливающийся подшипник;
1 – наружное кольцо; 2 – внутреннее кольцо,
3 – сепаратор; 4 – элемент качения



Общие принципы

Тип

Подшипники качения обычно включают два кольца (рис. 1), сепаратор и элементы качения. Элементы качения направляются сепаратором по дорожкам качения. В качестве элементов качения используются шарики, цилиндрические ролики, игольчатые ролики, конические ролики и самоустанавливающиеся ролики. Подшипник качения может смазываться консистентной смазкой. Для защиты от попадания грязи он устанавливается с крышками или прокладками.

В подшипниках качения происходит передача внешнего усилия с одного кольца подшипника на другое через элементы качения. В зависимости от основного направления нагрузки подшипники подразделяются на радиальные и осевые (упорные).

Конструктивные размеры

Подшипники качения являются готовыми к установке компонентами машин. Их наружные размеры приведены в стандартах DIN 623 и DIN ISO 355.

Для данного диаметра отверстия могут иметь место самые различные значения наружного диаметра и ширины подшипника. Для идентификации диапазонов ширины и диаметра подшипников качения используются стандартизованные коды.

Допуски

Допуски подшипников качения стандартизованы в соответствии с классами точности в стандартах ISO 492 и DIN 620. Подшипники качения нормальной точности, т.е с допуском класса P0 (также называемого PN) в общем случае отвечают всем требованиями, предъявляемым машиностроением к качеству подшипников. Для более строгих требований стандарт предусматривает более высокие классы точности P6, P5, P4, и P2.

Таблицы допусков можно найти в каталогах производителей подшипников качения.

Люфт подшипника

Люфт не установленного подшипника качения представляет собой расстояние, на которое кольца подшипника можно сдвинуть относительно друг друга. Необходимо различать осевой и радиальный люфты.

Радиальный люфт определен а стандарте DIN 620, Часть 4. Нормальная категория радиального люфта - C0. В соответствии с условиями эксплуатации, такими как, например, переходные режимы и высокие температуры, можно использовать другие категории радиального люфта C1 и C2 (< C0) или C3 и C4 (> C0).

Осевой люфт определяется радиальным люфтом и геометрией элементов качения и всегда приводится как справочный параметр.

Материалы

Кольца и элементы качения подшипников изготавливаются из специальной легированной хромом стали (100 Cr6 (DIN 17 230) или 52 100 (ASTM A295) с высокой степенью очистки и твердостью HRC 58–65.

Изготавливаются из металлического листа или пластика. Металлический сепаратор в небольших подшипниках качения как правило изготовлен из листовой стали.

Для изготовления пластмассовых сепараторов в большинстве случаев используется полиамид 66 (PA66). Этот материал, особенно когда он упрочнен стекловолокном, отличается превосходным сочетанием прочности и эластичности. Сепараторы из полиамида PA66, упроченного стекловолокном, пригодны для длительной работы при температурах до 120 °C.

Для особых условий эксплуатации (очень высоких тепловых нагрузок) в качестве материалов сепараторов применяются другие термопласты и дуропласты.

Выбор подшипников качения

Чтобы правильно выбрать подшипник из огромного количества вариантов, необходимо учитывать большое количество внешних факторов.

Критерии выбора

Нагрузка

Тип и размер подшипника качения обычно определяются величиной и направлением воздействующей на него нагрузки. В случае низких и средних нагрузок обычно применяются шарикоподшипники с глубокими дорожками качения. Роликовые подшипники имеют преимущества в случае высоких нагрузок и ограниченного пространства для установки. За исключением только радиально нагруженных игольчатых подшипников, роликовых подшипников, с цилиндрическими роликами и упорных подшипников подшипники качения могут одновременно воспринимать радиальные и осевые нагрузки (комбинированную нагрузку).

Шарикоподшипники с глубокими дорожками качения передают осевые нагрузки в обоих направлениях, в то время как радиально-упорные шарикоподшипники и конические роликоподшипники могут быть нагружены только в одном направлении.

Роликовые подшипники с цилиндрическими роликами и самоустанавливающиеся подшипники особенно подходят для радиальных нагрузок и в меньшей степени для осевых нагрузок.

Скорость вращения

Шарикоподшипники с точечным контактом между элементами качения имеют более высокий предел скорости вращения, чем роликоподшипники такого же размера. Допустимая скорость вращения подшипника качения также зависит от процесса смазки. Подшипник, смазываемый маслом, имеет более высокий предел скорости вращения, чем подшипник, смазываемый консистентной смазкой.

Сборка

Существенным является также различие между подшипниками с фиксацией в осевом направлении и без фиксации. К нефиксированным подшипникам можно отнести конические роликоподшипники, радиально-упорные шарикоподшипники, роликовые подшипники с цилиндрическими роликами и игольчатые подшипники. Эти подшипники как правило легче собирать и разбирать, чем фиксированные подшипники, такие как шарикоподшипники с глубокими дорожками качения и самоустанавливающиеся подшипники. Во время сборки конических роликоподшипников и радиально-упорных шарикоподшипников необходимо отрегулировать их люфт и предварительный натяг, что всегда требует большой осторожности

Дополнительные критерии выбора

В дополнение к вышеуказанным критериям при выборе подшипника качения необходимо также учитывать возможность угловой регулировки с целью компенсации смещения опорных точек, плавность хода, трение и стоимость.

Схемы установки подшипников

Как правило, для направления и опоры вращающейся части машины требуется установить на некотором расстоянии друг от друга два

подшипника. При этом имеются два важных варианта установки подшипников.

Схема с упорным и плавающим подшипниками

Два радиальных подшипника посажены на вал и в корпусе. Расстояние между двумя опорными точкам определяется переходными частями в пределах допуска. Кроме того, следует учитывать, что вал и корпус нагреваются до различных температур и изготавливаются из различных материалов, поэтому расширяются неодинаково. Эти различия должны быть скомпенсированы в опорных точках. По этой причине один подшипник должен быть закреплен в осевом направлении, а другой должен быть в этом направлении подвижен, как плавающий подшипник (см. рис. 2). Типичные применения схемы с упорным и плавающим подшипниками: генераторы, приводы механизмов рулевого управления.

В качестве упорных подшипников часто используются однорядные шарикоподшипники с глубокими дорожками качения. В качестве плавающих подшипников обычно используются роликовые подшипники с цилиндрическими роликами, игольчатые подшипники и шарикоподшипники со свободным перемещением наружного кольца относительно внутреннего.

В случае высоких радиальных и осевых нагрузок, например в качестве ступичных подшипников также используются двухрядные радиально-упорные шарикоподшипники и конические роликоподшипники.

Рис. 2. Схема с упорным и плавающим подшипниками

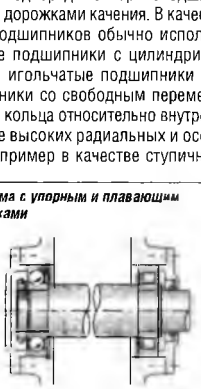


Рис. 3. Схема установки подшипников с предварительным натягом

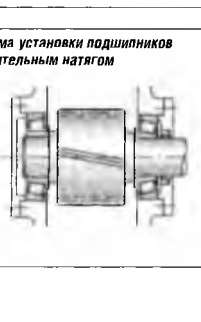


Схема установки подшипников с предварительным натягом

Схема установки подшипников с предварительным натягом показана на рис. 3. Во время сборки кольцо подшипника смещается по его посадочной поверхности до тех пор, пока не будет достигнут желаемый люфт или предварительный натяг. Благодаря возможности регулировки люфта схема установки подшипников с предварительным натягом особенно хорошо подходит для применений, требующих точной регулировки, например, в трансмиссиях.

Допуски и посадки подшипниковых узлов

Подшипники качения как правило имеют отрицательные допуски диаметра отверстия, наружного диаметра и ширины, т.е. номинальный размер всегда является максимальным размером.

Установка колец в опорных точках (на валу и в расточке корпуса) является важной при сборке подшипников качения. Прежде всего подшипники качения не должны проскальзывать в касательном направлении под действием нагрузок со стороны вала или корпуса. Самым безопасным и легким способом обеспечить правильную установку является правильный выбор посадок и допусков с тем, чтобы нагрузочная способность подшипника могла использоваться в полной степени. В зависимости от диапазона допуска посадочного гнезда подшипника применяются свободная посадка, переходная посадка или посадка с натягом (см. рис. 4).

Для правильного выбора посадки крайне важно знать условия нагрузки колец подшипника. При этом, в зависимости от направления нагрузки и вращения колец подшипника проводится различие между двумя типами нагрузки:

- нагрузка качения – кольцо вращается относительно направления нагрузки и должно быть плотно посажено;
- сосредоточенная нагрузка – кольцо неподвижно относительно направления нагрузки и может быть установлено с плотной подвижной посадкой или посадкой с натягом.

Вследствие малой толщины колец подшипника вариации формы посадочных гнезд передаются на дорожки качения. Отсюда следует, что сопряженные части должны иметь как можно лучшее качество формы в отношении, например, концентричности, цилиндричности и биения.

Расчет наибольшего допустимого давления

При вычислении нагрузочной способности подшипника качения необходимо различать статическую и динамическую нагрузочную способность. Основные принципы вычисления статической нагрузочной способности приведены в стандарте ISO 76, а динамической нагрузочной способности – в стандарте ISO 281.

Статическая нагрузочная способность

Если подшипник качения подвергается нагрузке в неподвижном состоянии или во время вращения с низкой скоростью, т.е. при $n d_m \leq 4000$ мм · мин$^{-1}$ (n – скорость вращения, d_m – среднее значение диаметра расточки и наружного диаметра), считается, что на него воздействует статическая нагрузка.

Если подшипник испытывает нагрузку как в радиальном, так и в осевом направлении, эквивалентная статическая нагрузка подшипника P_0 определяется следующим образом:

$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$ в Н,

где

X_0 – коэффициент радиальной нагрузки; X_0 = 0,6 для однорядных шарикоподшипников с глубокими дорожками качения;

Y_0 – коэффициент осевой нагрузки; Y_0 = 0,5 для однорядных шарикоподшипников с глубокими дорожками качения;

F_r – радиальная нагрузка в Н;

F_a – осевая нагрузка в Н.

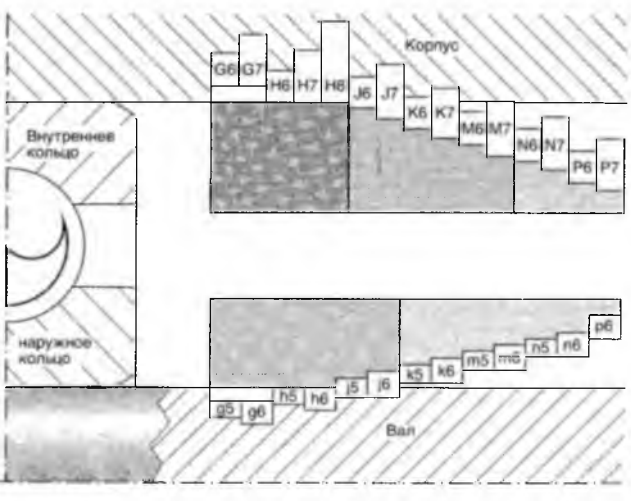
При $P_0 < F_r$ следует принимать $P_0 = F_r$. Коэффициенты X_0 и Y_0 для подшипников других типов см. в каталогах изготовителей подшипников качения.

В качестве меры статической нагрузочной способности используется соотношение

$f_0 = \frac{C_0}{P_0}$,

где C_0 – условная статическая нагрузка. C_0 определяет нагрузку, при которой общая остаточная деформация элементов качения и колец в наиболее нагруженной точке контакта составляет 0,0001 диаметра элемента

Рис. 4. Посадки подшипников



качения. В каталогах указывается значение C_0 для всех подшипников качения.

В случае обычных требований может быть принято характеристическое значение $f_s = 1$. Требование меньшей величины деформации (< 0,0001) соответствует более высокому характеристическому значению $f_s > 1$.

Динамическая грузоподъемность

Вычисление динамической грузоподъемности основано на методе, приведенном в стандарте ISO 281. Эта характеристика определяет срок службы вращающегося под нагрузкой подшипника качения, когда рабочие поверхности могут испытывать усталость материала. При этом важной характеристикой является номинальная динамическая нагрузочная способность C. Она определяет нагрузку подшипника качения, при которой его номинальный ресурс составит один миллион оборотов.

Для вычисления номинальноой долговечности подшипника, в соответствии со стандартом ISO 281, используются следующие параметры и соотношения:

$$L_{10} = 10^6 \left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ в оборотах,}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n}\left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ в часах, где}$$

L_{10} – номинальная долговечность, достигшая или превысившая 90 % ресурса идентичных подшипников из одной большой партии;

C – номинальная динамическая нагрузка в Н, указываемая в каталогах подшипников;

P – эквивалентная грузоподъемность в Н;

p – показатель степени, $p = 3$ для шарикоподшипников, $p = 10/3$ для роликоподшипников;

n – скорость вращения в мин$^{-1}$.

Эквивалентная динамическая нагрузка P определяется как воображаемая нагрузка, постоянная по величине и направлению, которая оказывает такое же влияние на срок службы подшипника, как фактические радиальная и осевая нагрузки. Она может быть определена по формуле:

$P = X F_r + Y F_a$ в H, где

F_r – радиальная нагрузка;

F_a – осевая нагрузка.

Коэффициенты радиальной нагрузки X и осевой нагрузки Y зависят от типа подшипника, размера, величины люфта и соотношения нагрузки и указаны в стандарте ISO 281 или каталогах подшипников качения.

Уточненная долговечность

В дополнение к номинальному ресурсу подшипника в стандарте ISO 281 приводится уточненная долговечность L_{na}, для которой в расчет могут быть также включены параметры, определяющие условия эксплуатации:

$$L_{na} = a_1\, a_2\, a_3\, L_{10}\,,$$

где

a_1 – вероятностный коэффициент, например, для вероятности 90 %: $a_1 = 1$; 95 %: $a_1 = 0{,}62$;

a_2 – коэффициент, учитывающий специальную конструкцию подшипника (внутреннюю конструкцию и материалы);

a_3 – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации подшипника, такие как смазка и рабочая температура.

Поскольку коэффициенты a_2 и a_3 в общем случае не являются независимыми, они часто объединяются в обобщенный коэффициент трения a_{23}:

$$L_{na} = a_1\, a_{23}\, L_{10}\,.$$

Многочисленные систематические исследования и практический опыт эксплуатации дают возможность количественно оценить влияние материалов и условий эксплуатации на достижимый срок службы подшипников качения. Изготовителями подшипников представлены диаграммы и компьютерные программы вычислений коэффициентов a_2, a_3 и a_{23}.

Зубчатые передачи (эвольвентные)

Определения

Зубчатые передачи служат для того, чтобы непрерывно передавать силу и крутящий момент двух валов, расположение которых определяет тип имеющейся зубчатой передачи (табл. 1).

Эвольвентное зацепление
Эвольвентное зацепление: передача нечувствительна к изменению межосевого расстояния. Изготавливается методом обкатки.

Все прямозубые цилиндрические передачи с одинаковым модулем зацепления могут изготавливаться на одном оборудовании, независимо от количества зубьев и размеров головки.

Модули зацепления цилиндрических и конических зубчатых колес стандартизированы по DIN 780; модули зацепления червячных передач по DIN 780; модули шлицевых соединений по DIN 5480; модули зубчатого зацепления нормального профиля для шестерен со спиральными зубьями по DIN 780.

Форма зубьев
Для прямозубых цилиндрических передач форма зубьев определяется DIN 867, DIN 58400; конических передач – DIN 3971; червячных передач – DIN 3975; шлицевых соединений – DIN 5480.

Форма зубьев гипоидных передач регламентируется стандартом DIN 867. В дополнение к стандартным углам зацепления (20°

Рис. 1. Эвольвента:
1 – основная окружность; 2 – эвольвента;
d_b – диаметр основной окружности

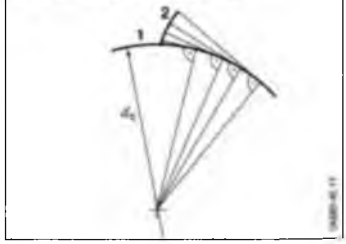


Таблица 1. Типы зубчатых передач

Расположение валов	Тип зубчатой передачи		Примеры
Параллельное		Цилиндрическая прямозубая	С прямыми или косыми зубьями, с внешним или внутренним зацеплением; планетарная передача
Пересекающееся		Коническая	С прямыми, косыми или спиральными зубьями в дифференциалах
Перекрещивающееся		Гипоидная	Главная передача
		Червячная	Привод стеклоочистителя
		Косозубая коническая	Регулировка сидений, сервопривод стекол, привод люка
Концентрическое		Эвольвентные шлицы	Соединение валов и втулок

для зубчатых передач и 30° для шлицевых соединений) применяются также и углы зацепления 12°, 14°30', 15°, 17°30', 22°30' и 25°.

Корригирование зубчатого зацепления (изменение высоты головки зуба)

Рис. 2. Прямые и косые зубья (наружное зацепление):
a – прямозубое зацепление;
b – косозубое зацепление

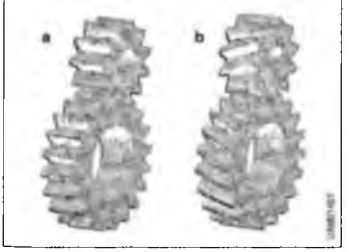


Рис. 3. Внутреннее зацепление
Обозначения см. в табл. 2

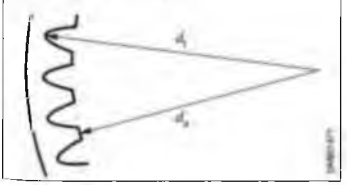
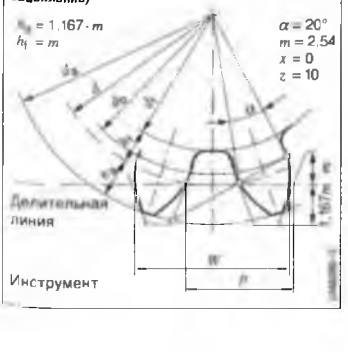


Рис. 4. Характеристики прямозубой цилиндрической передачи (циклоидальное зацепление)



Корригирование зубчатого зацепления (изменение высоты головки зуба (см. рис. 5) применяется для предотвращения подрезания у шестерен с малым количеством зубьев; позволяет увеличить прочность ножки зуба и точно обеспечить межосевое расстояние.

Зубчатые пары с точно заданным межосевым расстоянием

У зубчатых пар с точно заданным межосевым расстоянием изменение высоты головки зуба для шестерни и зубчатого колеса производится на одинаковую величину, но в противоположных направлениях, что позволяет со-

Таблица 2. Величины и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
a	Межосевое расстояние	мм
A	Вхождение в зацепление	–
b	Ширина зуба	мм
c	Зазор в основании	мм
C	Полюс зубчатого зацепления	–
d	Диаметр делительной окружности	мм
d_a	Диаметр окружности выступов	мм
d_b	Диаметр основной окружности	мм
d_f	Диаметр впадин	мм
d_w	Начальный диаметр	мм
E	Окончание зацепления	–
h_a	Головка зуба	мм
h_{aP}	Головка зуба	мм
h_f	Ножка зуба	мм
h_{fP}	Ножка зуба	мм
i	Передаточное отношение	–
j_n	Нормальный зазор между зубьями	мм
m_n	Нормальный модуль зацепления	мм
m_t	Торцевой модуль зацепления	мм
n	Частота вращения	мин$^{-1}$
p	Шаг зубьев $p = \pi m$	мм
s	Толщина зуба	мм
W_k	Зона контакта	мм
x	Коэффициент корригирования зубчатого зацепления	–
z	Число зубьев	–
α	Угол зацепления	°
α_{wt}	Эффективный угол зацепления	°
β	Угол подъема винтовой линии	°
ρ	Радиус внутренней галтели	мм
ε	Коэффициент перекрытия	–

Индексы:
1 – ведущего колеса 1; 2 – ведомого колеса 2;
a – головки зуба; f – впадины,
* – специальный указатель модуля m

Таблица 3 Расчетные формулы

Теоретическое число зубьев	$z_i = z \cdot \text{inv}\,\alpha_t / \text{inv}\,\alpha_v$
Торцевой угол зацепления	α_t из $\tan\alpha_t = \dfrac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}$
Эффективный угол зацепления	$\cos\alpha_{wt} = \dfrac{d_{b1}}{d_{w1}} = \dfrac{d_{b2}}{d_{w2}}$
Диаметр делительной окружности	$d = \dfrac{z \cdot m_n}{\cos\beta}$
Диаметр основной окружности	$d_b = d \cdot \cos\alpha_t$
Диаметр окружности выступов	$d_a = d + 2x m_n + 2h_a$
Диаметр впадин	$d_f = d + 2x m_n - 2h_f$
Начальный диаметр	$d_{w1} = \dfrac{2z_1 a}{z_1 + z_2}$ $d_{w2} = \dfrac{2z_2 a}{z_1 + z_2}$
Эвольвентное зацепление	$\text{inv}\,\alpha = \tan\alpha - \text{arc}\,\alpha$
Межосевое расстояние с зазором	$a = \dfrac{d_{b1} + d_{b2}}{2\cos\alpha_{wt}}$ где $\text{inv}\,\alpha_{wt} = \text{inv}\,\alpha_t + \dfrac{2m_n(x_1 + x_2)\sin\alpha_n + j_b}{(z_1 + z_2) m_t \cos\alpha_t}$
Толщина зуба на основной окружности (длина дуги)	$s_n = m_n\left(\dfrac{\pi}{2} + 2x\tan\alpha_n\right)$
Линейная длина зацепления с учетом числа зубьев k в зацеплении	$W_k = m_n\left[2x\sin\alpha_n + \cos\alpha_n \cdot \left[\pi(k - 0{,}5) + z_i\,\text{inv}\,\alpha_n\right]\right]$
Число зубьев в зацеплении (округленное до следующего целого числа)	$k \approx \dfrac{\alpha_{nx}}{180} + 0{,}5$ где $\cos\alpha_{nx} \approx \dfrac{z}{z + 2x} \cdot \cos\alpha_n$
Расчет коэффициента корригирования зубчатого зацепления из W_k	$x = \dfrac{\dfrac{W_k}{m_n} - \left[\pi(k - 0{,}5) + z_i\,\text{inv}\,\alpha_n\right] \cdot \cos\alpha_n}{2\sin\alpha_n}$
Действительный шаг зубьев	$p_n = \pi m_n$
Торцевой основной шаг зубьев	$p_{te} = \dfrac{\pi m_n}{\cos\beta} \cdot \cos\alpha_t = p_t \cos\alpha_t$
Коэффициент смещения	$\varepsilon_\alpha = \dfrac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} + \dfrac{z_2}{\lvert z_2 \rvert}\sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}}{2\pi m_t \cos\alpha_t} - \tan\alpha_{wt} \cdot (d_{b1} + d_{b2})$
Коэффициент перекрытия	$\varepsilon_\beta = \dfrac{B\beta}{p_t} = \dfrac{b\sin\beta}{m_n \pi}$
Общий коэффициент контакта	$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$ Применяется только при: $\varepsilon_\alpha > 1$ for $d_{a\min}$ and $a_{\max}$

хранить межосевое расстояние неизменным. Такое решение применяется в гипоидных и косозубых передачах.

Таблица 4. Обзор стандартов зубчатых передач

Стандарт	Описание
DIN 780	Модули зацепления зубчатых передач
DIN 867	Основные формы зубьев цилиндрических прямозубых передач
DIN 3960 (с приложением 1)	Определения и параметры
DIN 3961, DIN 3962, DIN 3963	Рекомендуемые допустимые определения для цилиндрических прямозубых передач
DIN 3965	Рекомендуемые допустимые определения для конических зубчатых передач
DIN 3971	Основные формы зубьев конических зубчатых передач
DIN 3974	Рекомендуемые допустимые определения для червячных передач
DIN 3975	Основные формы зубьев червячных передач
DIN 3990, DIN 3991	Расчет допустимого давления
DIN 3993	Зубчатые пары с внутренним зацеплением
DIN 3999	Символы и условные знаки в Германии, Великобритании и Франции
DIN 5480	Эвольвентные шлицы
DIN 58400	Основные формы зубьев цилиндрических прямозубых передач для точной механики
DIN 58425	Зубчатые колеса с круговыми зубьями
ISO 8123	Европейский шаг зубьев по диаметру делительной окружности для зубчатых передач стартеров с углами зацепления 12° и 20°
ISO 9457-1	Метрические зубчатые передачи стартеров с углом зацепления 14,5°
ISO 9457-2	Метрические зубчатые передачи стартеров с углом зацепления 20°
NF R11-411	Французские зубчатые передачи стартеров с углами зацепления 12° и 20°
SAE J 543	Американский шаг зубьев по диаметру делительной окружности для зубчатых передач стартеров с углами зацепления 12° и 20°

Зубчатые пары с изменяемым межосевым расстоянием

Изменение высоты головки зуба для шестерни и зубчатого колеса производится независимо друг от друга, поэтому межосевое расстояние передачи может изменяться.

Допускаемые отклонения

Допускаемые отклонения линейных размеров зубчатых передач регламентированы; для прямозубых цилиндрических передач – DIN 3960, DIN 58405; для конических передач – DIN 3971; червячных передач – DIN 3975.

Подставляя $j_n = 0$ в приведенные выше формулы, рассчитывают параметры зацепления без зазора между зубьями. Для определения зазора между зубьями допускаемые отклонения толщины зубьев и зоны их зацепления принимают в соответствии со стандартами DIN 3967 и DIN 58405 в зависимости от требуемой степени точности зубчатой передачи. Следует отметить, что не обязательно стремиться к нулевому зазору между зубьями; для компенсации имеющихся отклонений размеров зубьев и сборки шестерен достаточно иметь минимальный зазор, который, кроме того, предотвращает возможность заклинивания зубчатых колес. Допускаемые отклонения других расчетных параметров (зазор между ножками двух смежных зубьев, межцентровое расстояние) приведены в стандартах DIN 3963, DIN 58405, DIN 3962 T2, DIN 3967, DIN 3964.

Рис. 5. Корригирование зубчатого зацепления прямозубой цилиндрической передачи (циклоидальное зацепление):
x – коэффициент головки зуба;
m – модуль зацепления

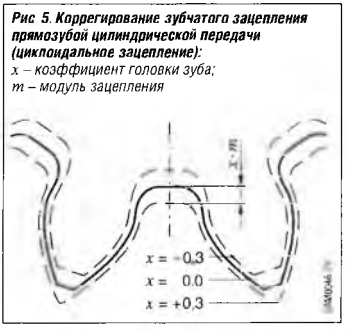


Таблица 5 Степени точности зубчатых передач (DIN 3961 ... 3964)

Степень точности	Примеры применения	Технология изготовления
2	Высший стандарт точности зубчатых передач	Шлифование (50...60% брака)
3	Основной стандарт для контроля качества	Шлифование и обкатка
4	Норматив точности для производственных процессов, измерительных механизмов	
5	Норматив точности для машинного и измерительного оборудования, турбин	
6	Как для степени 5, а также норматив точности для высокоточных передач легковых автомобилей и трансмиссий автобусов	
7	Для высокоточных трансмиссий автомобилей, машинного оборудования, железнодорожных вагонов и локомотивов, подъемнотранспортного оборудования, турбин, офисной техники	Неупрочненные колеса, обрабатываемые фрезерованием и шевингованием с последующей обкаткой, а также шлифованием закаленных колес
8 и 9	Для автомобильных трансмиссий, рельсовых транспортных средств, механизированного инструмента, офисного оборудования	Фрезерование и шевингование с последующей обкаткой
10	Трансмиссии сельскохозяйственных тракторов и машин, вспомогательных механизмов общего механического оборудования, грузоподъемных машин	Все обычные процессы механической обработки, литье под давлением для полимерных зубчатых колес
11 и 12	Общее сельскохозяйственное оборудование	

Зубчатая передача стартера

Система допускаемых отклонений для зубчатых передач по «Стандарту межосевых расстояний» (DIN 3961) применяется в силовых приводах, где требуемый зазор между зубьями обеспечивается отрицательными допусками толщины зубьев. Эта система неприменима для зубчатых передач автомобильных стартеров, поскольку они работают со значительно большими зазорами между зубьями, которые обеспечиваются увеличением межосевого расстояния.

Большой крутящий момент, необходимый для пуска двигателя, требует применения зубчатой передачи с большим передаточным отношением (i = 10–20). Поэтому шестерня стартера имеет малое количество зубьев (z = 9–11), обычно с положительным смещением. Для шага зубьев принято следующее обозначение: количество зубьев, равное, например, 9/10, означает нарезку девяти зубьев на заготовке, рассчитанной по диаметру на 10 зубьев, и соответствует смещению +0,5. При этом допускаются небольшие отклонения величины коэффициента x. (Это обозначение нельзя смешивать с обозначением P 8/10, приведенным ниже).

Стандарты зубчатых передач США

Вместо модуля для стандартизации зубчатых передач в США используется показатель количества зубьев на 1 дюйм (25,4 мм) диаметра делительной окружности или диаметральный модуль (питч) (P):

$$P = z/d = z/(z \cdot m/25{,}4) = 25{,}4/m.$$

Для перевода стандарта США в европейский стандарт служит зависимость:

$$m = \frac{25{,}4\ \text{мм}}{P}.$$

Размещение зубьев в пределах диаметрального модуля называется окружным шагом зацепления (CP):

$$CP = \frac{25{,}4\ \text{мм}}{P}\pi$$

Шаг p = 25,4 мм · CP

Полная высота зуба

В стандартах США полная высота зуба обозначается как высота головки $h_a = m$, что соответствует величине m в стандартах Германии.

Ножка зуба
Обозначается так же, как и полная высота зуба, но расчет головки зуба основывается на использовании своего модуля. Пример обозначения:

Обозначение (пример): P 5 /7
$P = 7$ для расчета головки зуба,
$P = 5$ для расчета других параметров.

Система обозначений и преобразований
Диаметр окружности выступов:
$OD = d_a$.

Диаметр делительной окружности:

$PD = \frac{N}{P} = d$ (в дюймах).

$PD = N \cdot m = d$ (в мм).

Диаметр окружности впадин:
$RD = d_f$

Начальный диаметр:

$LD = \frac{(N+2x)}{P}$ (в дюймах).

$LD = (N+2x)m$ (в мм).

$LD \approx d_w$,

где d_w – диаметральный модуль.

Расчет наибольшего допустимого давления

Ниже приведены расчетные формулы, которые могут применяться вместо стандартного расчета DIN 3990 «Расчет несущей способности зубчатых передач». Эти зависимости применимы для расчета нагружения трансмиссионных зубчатых пар, работающих в стандартном режиме.

Необходимое сопротивление усталостному выкрашиванию и изнашиванию металла для шестерни (колесо 1) вследствие высокого контактного давления достигается, если величина оценки сопротивления выкрашиванию Sw равна или больше 1. В случае зубчатого зацепления с $z_1 < 20$ следует принимать $S_w \geq 1{,}2$. 1,5 из-за более высоких контактных напряжений в точке однопарного зацепления. Поскольку контактные давления равны по величине для обоих колес, значение k_{perm} для зубчатого колеса 2 следует принимать такими же, как и для колеса 1 при частоте вращения n_2, пользуясь помещаемой ниже таблицей.

Содержащиеся в таблице значения коэффициента k_{perm} применимы, когда оба колеса изготовлены из стали. Для пар зубчатых колес из чугуна и стали или бронзы и стали этот коэффициент следует увеличить в 1,5 раза. В случае зубчатых пар из чугуна по чугуну или бронзы по бронзе коэффициент k_{perm} следует увеличить примерно в 1,8 раза. Для зубчатого зацепления лишь с одним поверхностно упрочненным колесом коэффициент kperm

Таблица 6. Модули зубчатых передач стартеров

Модуль m, мм	Шаг зубьев по диаметру делительной окружности P, 1/дюйм	Угол зацепления α зубчатой пары	Стандарт США	Европейский стандарт
2,1167	12	12°	SAE J 543c	ISO 8123
2,54	10	20°	SAE J 543c	ISO 8123
3,175	8	20°	SAE J 543c	ISO 8123
4,233	6	20°	SAE J 543c	ISO 8123
2,25	–	14,5°/20°	–	ISO 9457-1/2
2,5	–	14,5°/20°	–	ISO 9457-1/2
3	–	14,5°/20°	–	ISO 9457-1/2
3,5	–	14,5°/20°	–	ISO 9457-1/2
4	–	14,5°/20°	–	ISO 9457-1/2

Таблица 7. Величины и единицы измерения для расчета наибольшего допустимого давления

Обозначение	Величина	Единица измерения
P	Мощность	кВт
M	Крутящий момент	Н·м
n	Частота вращения	мин$^{-1}$
F_{tw}	Окружная сила на делительной окружности	Н
u	Передаточное отношение	–
Φ	Коэффициент срока службы	(см. табл. 10)
HB	Твердость по Бриннелю	(см. табл. 13)
HRC	Твердость по Роквеллу	(см. табл. 13)
b_n	Эффективная ширина ножки зуба	мм
b	Ширина зуба	мм
k	Контактное давление	Н/мм^2
L_h	Срок службы	ч
N_L	Число изменений нагрузки	(см. табл. 13)
S	Запас прочности	–
f_v	Коэффициент скорости	(см. табл. 12)
Y_{Fa}	Коэффициент профиля зуба	(см. рис. 6)
Y_L	Коэффициент знакопеременной нагрузки	(см. табл. 11)
Y_{NT}	Коэффициент срока службы (ножка зуба)	(см. табл. 13)
σ	Напряжение в ножке зуба	Н/мм^2
d	Диаметр делительной окружности	мм
d_w	Начальный диаметр	мм
v	Окружная скорость	м/с
Z	Число зубьев	Z_1 для шестерни с меньшим числом зубьев
β	Угол подъема винтовой линии	°
Питтинг		Ослабление ножки зуба в результате избыточного контактного давления и чрезмерного изменения нагрузки

Таблица 8. Формулы для расчета наибольшего допустимого давления

Мощность	$P = \frac{M \cdot n}{9{,}549} = \frac{F_{tw} d_w n}{1{,}9 \cdot 10^6}$
Окружная сила на делительной окружности	$F_{tw} = \frac{2000 \cdot M}{d_w} = \frac{19{,}1 \cdot 10^6 \, P}{d_w n}$
Передаточное отношение	$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_2}{n_1}$ (шестерня 1 имеет меньшее число зубьев)
Коэффициент срока службы	$\Phi = \sqrt[6]{5000/L_h}$
Допустимое контактное давление	$k_{perm} = \frac{(HB)^2}{2560 \cdot \sqrt[6]{n}} = \frac{(HRC)^2}{23{,}1 \cdot \sqrt[6]{n}}$
Действительное контактное давление	$k_{act} = \sqrt{\frac{F_{tw}}{b_n d_w} \frac{(u+1)\cos^2\beta}{u \sin(2\alpha_{wt})}}$
Сопротивление питтингу	$S_w = \Phi \frac{k_{perm}}{k_{act}} \geq 1$ $S_w \geq 1{,}2 \ldots 1{,}5$ for $z_1 < 20$ За счет большего давления при вхождении в зацепление

для незакаленного колеса необходимо увеличить на 20%. Все приведенные в таблице значения этого коэффициента рассчитаны на срок службы L_h = 5000 ч. При оценке сопротивления выкрашиванию металла зубчатых колес Sw расчетный срок их службы может изменяться за счет коэффициента срока службы ϕ.

Прочностные характеристики материалов для изготовления зубчатых передач приведены в табл. 13.

Коэффициент срока службы ϕ

Коэффициент срока службы используется для корректирования приведенных в верхней таблице значений коэффициента допустимого контактного давления kperm (рассчитанного на срок службы L_h = 5000 ч) для различной расчетной продолжительности работы зубчатой передачи.

Рекомендации по выбору расчетного срока службы зубчатых передач: при постоянной работе с полной нагрузкой – от 40 000 до 150 000 ч; при прерывистой полной нагрузке – от 50 до 5000 ч.

Необходимая величина сопротивления разрушению зуба обеспечивается при $S_F \geq 1$ для шестерни (колесо 1).

Если шестерня изготовлена из более прочного материала, чем зубчатое колесо 2, следует также произвести проверочный расчет зубчатого колеса на изгибающие нагрузки.

Таблица 9. Коэффициент допустимого контактного давления k_{perm} в Н/мм²
(для срока службы L_h = 5000 ч)

Твердость зубьев		Частота вращения, мин⁻¹ (для однократного изменения нагрузки за 1 оборот колеса)											
HB	HRC	10	25	50	100	250	500	750	1000	1500	2500	5000	10000
90		2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	1,05	1,0	0,94	0,86	0,77	0,68
100		2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,15	1,06	0,94	0,84
120		3,8	3,3	2,9	2,6	2,2	2,0	1,9	1,8	1,66	1,53	1,36	1,21
140		5,2	4,5	4,0	3,6	3,9	2,7	2,5	2,4	2,26	2,08	1,85	1,65
170		7,7	6,6	5,9	5,2	4,5	4,0	3,7	3,6	3,34	3,06	2,73	2,43
200		10,7	9,1	8,1	7,3	6,2	5,6	5,2	4,9	4,6	4,24	3,78	3,37
230		14,1	12,1	10,8	9,6	8,2	7,3	6,9	6,5	6,1	5,61	5,0	4,45
260		18,0	15,4	13,8	12,2	10,5	9,4	8,8	8,4	7,8	7,17	6,39	5,69
280		20,9	17,9	16,0	14,2	12,2	10,9	10,2	9,7	9,0	8,31	7,41	6,6
300		24,0	20,6	18,3	16,3	14,0	12,5	11,7	11,1	10,4	9,54	8,5	7,6
330		29,0	24,9	22,2	19,8	17,0	15,1	14,1	13,5	12,6	11,6	10,3	9,2
400		42,6	36,6	32,6	29,0	24,9	22,2	20,7	19,8	18,5	17,0	15,1	13,5
	57	96,0	82,3	73,3	65,3	56,0	49,9	46,7	44,5	41,6	38,2	34,0	30,3
	≥ 62	112	96,5	86,0	76,6	65,8	58,6	54,8	52,2	48,8	44,8	39,9	35,6

Таблица 10. Коэффициент срока службы $Φ$

	При прерывистой полной нагрузке								При постоянной работе с полной нагрузкой			
Срок службы зубчатой передачи L_h в ч	10	50	150	312	625	1200	1500	5000	10000	40000	80000	150000
Коэффициент срока службы $Φ$	2,82	2,15	1,79	1,59	1,41	1,27	1,12	1	0,89	0,71	0,63	0,57

Таблица 11. Расчет зубчатого зацепления на изгиб и разрушение зуба

Окружная скорость $v_1 = v_2$	м/с	$v_1 = \pi d_1 n_1$
Коэффициент скорости f_v		Взять из табл. 12
Напряжение в ножке зуба, которое может образовываться σ_{Flim}		Взять, в соответствии с применяемым материалом, из табл. 13
Допустимое напряжение в ножке зуба σ_{Fperm}	Н/мм²	$\sigma_{Fperm} = \sigma_{Flim} Y_{NT} Y_L$ Взять σ_{Flim} и Y_{NT} из табл. 13, принимаются как промежуточные значения. $Y_L = 1$ для пульсирующей нагрузки, $Y_L = 0,7$ для знакопеременной нагрузки
Действительное напряжение в ножке зуба σ_{Fact}	Н/мм²	$\sigma_{Fact} = \frac{F_t Y_{Fa}}{b m_n f_v \varepsilon_\alpha} \left\{1 - \frac{\varepsilon_\beta \beta}{120°}\right\}$; Y_{Fa} из рис. 6. $\left\{1 - \frac{\varepsilon_\beta \beta}{120°}\right\}$ должно быть ≥ 0,75
Сопротивление разрушению зуба S_F	–	$S_F = \frac{\sigma_{Fperm}}{\sigma_{Fact}} \geq 1$

Рис. 6. Коэффициент профиля зуба Y_{Fa}



Коэффициент профиля зуба Y_{Fa} *(α = 20°) является функцией числа зубьев z и коэффициента смещения головки зуба x. В случае внутреннего зацепления Y_{Fa} ≈ 2,07 (см. рис.)*

$$Y_{Fa} = \frac{6 \cdot h_{Fa} \cdot \cos \alpha_{Fan} / m_n}{(s_{Fn} / m_n)^2 \cdot \cos \alpha_n}$$



Таблица 12. Скоростной фактор f_v

Материал	Окружная скорость вращения v в м/с							Основная формула [1]
	0,25	0,5	1	2	3	5	10	
Сталь и другие металлы	Скоростной фактор f_v							$f_v = \frac{A}{A+v}$
	0,96	0,93	0,86	0,75	0,67	0,55	0,38	
Слоистые тканевые и другие неметаллические материалы	0,85	0,75	0,62	0,5	0,44	0,37	0,32	$f_v = \frac{0,75}{1+v} + 0,25$

[1] Оценка действительна для A = 6 (средний уровень точности).

Таблица 13. Параметры материалов зубчатых передач

Материал		Условия	Предел прочности на разрыв R_m в Н/мм²	Предел усталостной прочности под воздействием напряжений изгиба σ_{bW} в Н/мм²	Твердость	Допустимый уровень напряжений ножки зуба[2] $\sigma_{F\,lim}$ в Н/мм²	Коэффициент срока службы при переменной нагрузке $N_L = L_h \cdot 50 \cdot n$				
			min	min	min		$\geq 3 \cdot 10^6$	10^6	10^5	10^4	10^3
Термообработанная сталь	St 60, C 45	Нормализованная, термически упрочненная	590 685 980	255 295 410	170 HB 200 HB 280 HB	160 185 245					
	St 70, C 60	Нормализованная, термически упрочненная	685 785 980	295 335 410	200 HB 230 HB 280 HB	185 209 245					
	50 Cr V 4	Нормализованная, термически упрочненная	685 1130 1370	335 550 665	200 HB 330 HB 400 HB	185 294 344	1	1,25	1,75	2,5	2,5
	37 Mn Si 5	Нормализованная, термически упрочненная	590 785 1030	285 355 490	170 HB 230 HB 300 HB	160 200 270					
Цементированная сталь	RSt 34-2, C 15	Нормализованная, поверхностно упрочненная	335 590	175 255	100 HB 57 HRC	110 160	1 1	1,25 1,2	1,75 1,5	2,5 1,9	2,5 2,5
	16 Mn Cr 5	Нормализованная, поверхностно упрочненная	600 1100	– –	150 HB 57 HRC	– 300	– 1	– 1,2	– 1,5	– 1,9	– 2,5
	20 Mn Cr 5	Нормализованная, поверхностно упрочненная	590 1180	275 590	170 HB 57 HRC	172 330	– 1	– 1,2	– 1,5	– 1,9	– 2,5
	18 Cr Ni 8	Нормализованная, поверхностно упрочненная	640 1370	315 590	190 HB 57 HRC	200 370	– 1	– 1,2	– 1,5	– 1,9	– 2,5
Серый чугун	GG-18	–	175	–	200 HB	50	1	1,1	1,25	1,4	1,6
	GS-52,1	–	510	–	140 HB	110	1	1,25	1,75	2,5	2,5
	G-SnBz 14	–	195	–	90 HB	100	1	1,25	1,75	2,5	2,5
	GGG-60	–	600	–	230 HB	210	1	1,25	1,75	2,5	2,5
Полиамид PA 66 PA 66+30% стекловолокна		до 60 °C	– 140	40 43	– –	27 29	1	1,2	1,75	–	–
Слоистые тканевые материалы, мелко- и крупнозернистые		–	– –	– –	– –	75 50	1 1	1,15 1,2	1,4 1,6	1,65 2,1	2,0 2,8

[1] При пульсирующей нагрузке для предела усталостной прочности ($N_L \geq 3 \cdot 10^6$). В случае знакопеременной нагрузки следует применять коэффициент Y_L.

[2] В пределах усталостной прочности в течение срока службы напряжения изгиба увеличиваются на коэффициент Y_{NT} в зависимости от количества циклов нагружения N_L.

Ременные передачи

Фрикционные ременные передачи

Применение

Фрикционные ременные передачи применяются в автомобилях в основном для привода тех или иных вспомогательный агрегатов (рис. 1). Ранее эти в этих передачах в основном использовались гладкие клиновые ремни. Однако, в связи со значительным увеличением удельной мощности в современных автомобилях вследствие ограниченного пространства и увеличением мощности, потребляемой вспомогательными агрегатами, в настоящее время эти передачи практически полностью заменены поликлиновыми передачами с клиновыми ребристыми ремнями (ремни Micro-V®). Типичными применениями являются приводы генератора, компрессора кондиционера, насоса гидроусилителя рулевого управления, вентиляторов, механических нагнетателей или насосов для вторичного нагнетания воздуха.

Ребристые клиновые ремни также используются для запуска двигателя на микрогибридных автомобилях . Здесь обычный стартер заменен стартером-генератором, и при запуске двигателя ременная передача передает крутящий момент на коленчатый вал.

Силы и нагрузки, действующие в ременной передаче

Передаваемая мощность определяется из соотношения:

$$P=(F_1-F_2)\cdot v/1000\ .$$

Таблица 1. Условные обозначения величин и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
F_1	Натяжение ведущей ветви ремня	Н
F_2	Натяжение ведомой ветви ремня	Н
F_U	Окружная сила	Н
F_{HL}	Сила предварительного натяжения или «нагрузка на ступицу»	Н
F_C	Центробежная сила ремня	Н
v	Скорость перемещения ремня	м/с
P	Мощность, передаваемая ременной передачей	кВт
α	Угол клина ремня	°
β	Угол обхвата шкива ремня	рад
μ	Коэффициент трения	-
L_B	Номинальная длина ремня	мм
U_B	Номинальная длина окружности	мм

Уравнение Айтелвейна описывает процесс перехода от трения покоя к трению скольжения:

$$R=F_1/F_2=e^{\mu\omega\beta}\ ,\ \text{где}\ \omega=1/\sin(\alpha/2).$$

Пока на ветви ремня действуют силы в соответствии с этим соотношением, проскальзывание при передаче мощности отсутствует. Термин «ветвь ремня» относится к секции ремня, расположенной между областями входа и схода двух соседних шкивов. Типичное соотношение для ребристых клиновых ремней $R=4$ с углом обхвата $\beta=180°$.

Для передачи окружного усилия

$$F_U=F_1-F_2$$

Рис. 1. Пример применения, система привода вспомогательный агрегатов:
1 – генератор, 2 – натяжной ролик; 3 – опорный ролик; 4 – шкив коленчатого вала; 5 – насос системы охлаждения двигателя; 6 – насос гидроусилителя рулевого управления, 7 – компрессор кондиционера

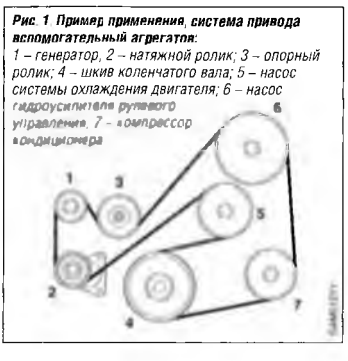
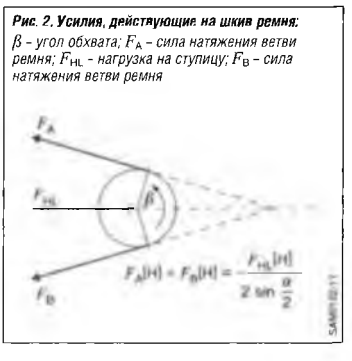


Рис. 2. Усилия, действующие на шкив ремня:
β - угол обхвата; F_A – сила натяжения ветви ремня; F_{HL} - нагрузка на ступицу; F_B – сила натяжения ветви ремня



требуется наличие силы предварительного натяжения $F_{\text{НЦ}}$ («нагрузки на ступицу») (рис. 2). При высоких скоростях вращения также следует учитывать центробежную силу ремня F_C.

Проскальзывание возникает вследствие изменения натяжения ремня во время чередования его нагруженной и ненагруженной ветвей.

Несмотря на то что передаваемый крутящий момент является постоянным, натяжение ремня уменьшается у ведущего шкива и увеличивается у ведомого шкива (см. рис. 3). Это изменение натяжения вызывает удлинение ремня на соответствующем шкиве. В этой области удлинения ремень теряет сцепление со шкивом и переходит в состояние проскальзывания. Ремень будет проскальзывать, если эта область проскальзывания распространяется на весь обхват шкива. На правильно рассчитанных передачах проскальзывание составляет менее 1%. Ребристые клиновые ремни работают с к.п.д более 96%.

Конструкция ребристого клинового ремня

Ребристый клиновой ремень состоит из трех компонентов (см. рис. 4):

- армированный волокнами резиновый компаунд;
- корд;
- основа или прорезиненная ткань.

Резиновый компаунд образует ребра и передает усилия привода со шкивов на корд. Основным используемым здесь материалом является каучук на основе сополимера этилена, пропилена и диенового мономера (EPDM). В целях упрочнения резиновый компаунд армирован волокнами.

Корд воспринимает динамические усилия и передает мощность привода от ведущего вала (обычно коленчатого вала) к вспомогательным агрегатам. Обычно корд изготовлен из нейлона, полиэфира или арамида. Эти материалы для корда значительно различаются в отношении их модуля упругости (см. рис. 5). Посредством надлежащего выбора материала

Рис. 3. Распределение напряжений в ремне:
F_1 – сила натяжения ведущей ветви;
F_2 – сила натяжения ведомой ветви;
$F_в$ – нагрузка ремня за счет обхвата;
F_C – воздействующие на ремень центробежные силы;
M – передаваемый крутящий момент;
ω – угловая частота

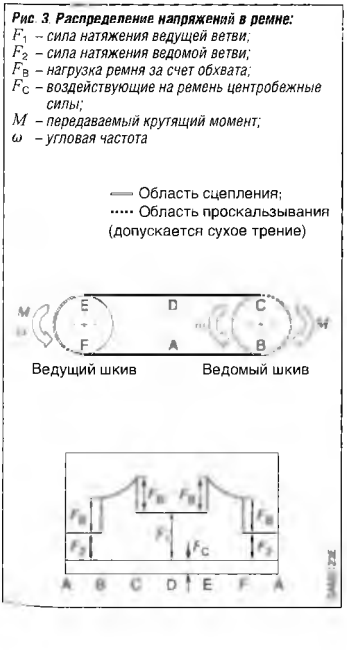
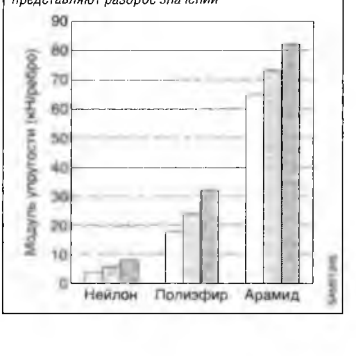


Рис. 4. Структура ребристого клинового ремня (поперечное сечение):
1 – основа или прорезиненная ткань;
2 – корд; 3 – резиновый компаунд, армированный волокном



Рис. 5. Модули упругости различных материалов корда
Три столбца для каждого материала представляют разброс значений



корда может быть оптимизировано динамическое согласование системы. Материалы корда с высоким модулем упругости (например, арамид) используются в высокодинамичных системах для влияния на резонансную частоту ременной передачи.

Обратная сторона ремня может быть в виде основы или прорезиненной ткани. Обратная сторона ремня образует защитный слой для корда. В большинстве случаев она служит только для направления ремня через опорные и натяжные ролики. В некоторых случаях, однако, она также служит для привода вспомогательный агрегатов, испытывающих низкую нагрузку (например, охлаждающего насоса).

Профиль ребристого клинового ремня и шкивов

Обычно на автомобилях используется профиль PK в соответствии со стандартом ISO 9981.

Номинальная длина ремня L_B определяется на испытательном стенде с двумя шкивами (рис. 6) при определенном предварительном натяжении (ISO 9981). Здесь эталонная длина окружности измерительных шкивов U_B равна 300 мм. Номинальная длина ремня вычисляется как:

$$L_B = U_B \cdot E .$$

Поскольку геометрия ремня и шкивов в стандарте ISO 9981 ограничена диапазоном допусков, абсолютно необходимо, чтобы детальная конфигурация соответствовала характеристическим значениям, указанным изготовителями ремня и шкивов. Шкивы изготавливаются из стали, алюминия или пластмассы.

Система привода: привод вспомогательных агрегатов

Главное требование, предъявляемое к системе привода вспомогательных агрегатов, заключается в том, что она должна осуществлять привод всех вспомогательных агрегатов без проскальзывания ремня. Это условие должно быть обеспечено для всех значений нагрузки и всех окружающих условий на протяжении всего срока службы двигателя. На современных двигателях с приводом всех вспомогательных агрегатов при помощи одной ременной передачи на все вспомогательные агрегаты через пяти- или шестиреберный ремень передаются крутящие моменты до 30 Н · м и мощности до 20 кВт. Температура окружающего воздуха находится в диапазоне от –40 до 100 °С. При этом важно использовать оптимальную конструкцию системы, чтобы, в частности, исключить шум, вызываемый проскальзыванием, такой как, например, знакомый всем визг, издаваемый ремнем в холодную или сырую погоду. Также необходимо использовать конструкцию, исключающую шум, издаваемый ремнем вследствие несоосности шкивов.

Критерии проектирования

Для проектирования приводов вспомогательных агрегатов применяются компьютерные программы, разрабатываемые как самими изготовителями, так и специализированными подрядчиками. При этом важными исходными параметрами являются расположение агрегатов, т.е конфигурация привода, кривая крутящего момента, моменты инерции деталей, параметры крутильных колебаний коленчатого вала и характеристики ремня. Используя эти данные, можно рассчитать и оптимизировать геометрию системы, например, длину ветвей ремня и угол обхвата, собственные частоты системы, предельные углы проскальзывания, усилия, действующие в ветвях ремня и параметры вибрации ветвей, а также срок службы ремня.

Рекомендуемый минимальный угол обхвата

Этот угол составляет 150° для шкива коленчатого вала, 120° – для шкива генератора, 90° – для шкивов насоса усилителя рулевого управления и компрессора кондиционера и 60° для натяжного ремня.

Несоосность и угол входа

Во избежание неприемлемых износа ремня и шума важно, чтобы шкивы были соосны, а угол между ремнем и плоскостью шкива не превышал 1°.

Рис. 6. Измерение длины ремня по стандарту ISO 9981
Эталонная окружность U_B измерительных шкивов. 300 мм

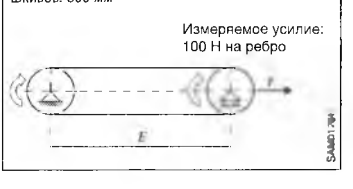


Таблица 2. Профиль PK зубчатого ремня и профиль шкива по стандарту ISO 9981

Обозначение ребристого клинового ремня с шестью ребрами профиля PK и номинальной длиной 800 мм:
ребристый клиновой ремень ISO 9981 - 6 PK 800
Обозначение соответствующего зубчатого шкива с номинальным диаметром 90 мм:
зубчатый шкив ISO 9981 - 6 Kx 90.

Размеры указаны в миллиметрах	Ремень	Впадины профиля
Код профиля	PK	K
Шаг ребер s и впадин e (рис. 7)	3,56	3,56
Допустимое отклонение для e		±0,05
Сумма допустимых отклонений для e		±0,30
Угол впадины α		40° ±0,5°
r_k у головки ребра и r_i у головки впадины	0,50	мин 0,25
r_a у седла ребра и r_f у седла впадины	0,30	мин. 0,50
Высота ремня h	4 – 6	
Номинальный диаметр контрольного стержня d_s		2,50
2 h_s (номинальный размер)		0,99
2 δ (рис. 7)		макс. 1,68
f (рис 7)		мин. 2,5

Ширина ремня $b = n\,s$ (где n = количество ребер), эффективный диаметр для профиля K $d_w = d_b + 2\,h_b$, $h_b = 1{,}6$ мм

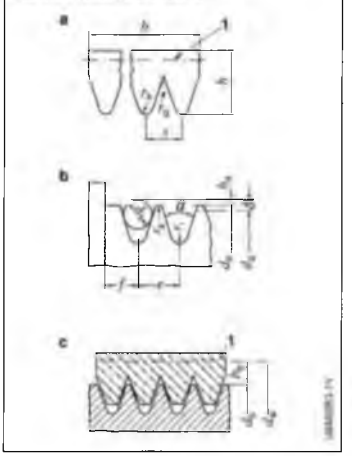
Собственная частота системы

Собственная частота системы не должна лежать в диапазоне оборотов холостого хода двигателя (двигателя 2-го рода).

Минимальные диаметры рабочих шкивов и натяжных роликов

На практике самый маленький шкив часто бывает установлен на генераторе с тем, чтобы обеспечить требуемую для него высокую скорость вращения. Типичные шкивы генераторов имеют диаметр от 50 до 56 мм. При использовании шкивов малого диаметра усталость ремня возрастает экспоненциально; это следует учитывать при проектировании ременной передачи. Рекомендуется использовать натяжные ролики диаметром не менее 70 мм.

Рис. 7. Профиль ремня:
a – поперечное сечение ремня,
b – поперечное сечение впадин,
c – определение эффективного диаметра;
1 – положение корда
Значения приведены в табл. 2



Системы натяжения ремня

Натяжение ремня в системах привода вспомогательный агрегатов в настоящее время обеспечивается натяжными роликами с автоматическим натяжением. Эти механизмы обеспечивают постоянное предварительное натяжение ремня на протяжении всего срока службы посредством компенсации удлинения и износа ремня. Конструкция натяжных механизмов в значительной степени определяется имеющимся в наличии свободным пространством. Значения усилия предварительного натяжения ремней 6 PK, в зависимости от динамики системы, обычно лежат в диапазоне от 250 до 400 Н.

Приводы Stretch Fit®

Эластичные ребристые ремни иногда используются в менее сложных ременных передачах. В этих ремнях в качестве материала корда используется нейлон, и они не требуют применения натяжных роликов. Ремень этого типа подвергается избыточному растяжению во время установки на шкивы. Длина ремня должна быть рассчитана таким образом, чтобы сила предварительного натяжения ремня после установки была столь велика, чтобы, несмотря на износ и удлинение

ремня на протяжении требуемого срока службы, а также с учетом окружающих условий, достаточное предварительное натяжение поддерживалось без дополнительной регулировки.

Зубчато-ременные передачи

Применение

Зубчатые ремни, в соответствии со стандартом DIN ISO 9010, используются в приводах механизма газораспределения и топливных насосов, требующих синхронизации с коленчатым валом. Основные преимущества по сравнению с передачами других типов, такими как зубчатые или цепные передачи, заключаются в простоте конструкции, гибкости системы направления ремня, низком трении и уровне шума и способности компенсировать высокие пиковые динамические нагрузки. В систему привода могут быть включены такие вспомогательные агрегаты, как масляные насосы и насосы системы охлаждения. В настоящее время во многих случаях, благодаря применению инновационных технологий производства ремней и оптимизации конструкций систем в целом, становится возможно вообще обойтись без периодической замены ремней.

Структура зубчатого ремня

Зубчатый ремень состоит из трех компонентов (см. рис. 8): нейлонового материала, резинового компаунда и корда.

Материал представляет собой высокопрочный нейлон и имеет стойкое к истиранию и износу покрытие. Он защищает резиновые зубья ремня от износа и срезания.

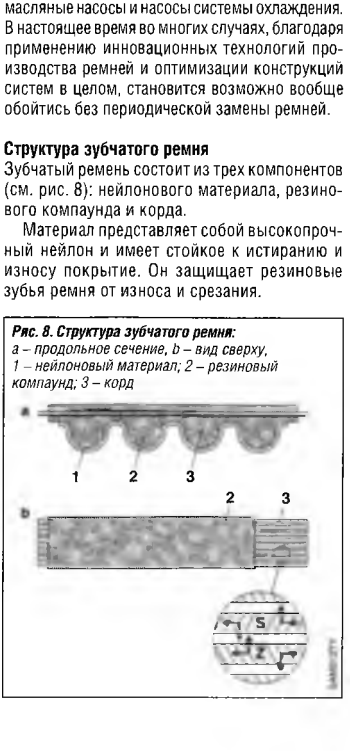


Рис. 8. Структура зубчатого ремня:
a – продольное сечение, b – вид сверху, 1 – нейлоновый материал; 2 – резиновый компаунд; 3 – корд

Резиновый компаунд представляет собой высокопрочный полимер и с обеих сторон охватывает корд. Первоначально в качестве этого материала использовался полихлоропрен (CR, хлоропреновый каучук). Высокие требования к температурной стойкости, стойкости к старению и динамической прочности заставляют использовать на современных автомобилях только гидрогенизированный нитрилбутадиеновый каучук (HNBR). В некоторых случаях, для условий, требующих особенно высокой нагрузочной способности, для еще большего упрочнения в структуру ремня включена дополнительная основа.

Корд изготовлен из скрученного стекловолокна. Этот материал отличается высокой прочностью на разрыв в сочетании с высокой способностью к изгибу. В процессе изготовления ремня корд располагается в ремне по спирали и попарно скручивается в соответствии с S- или Z-образной формой. Это обеспечивает преимущественно нейтральные условия нагрузки ремня.

Профили зубчатых ремней

Первые ремни, предназначенные для привода распределительных валов, имели зубья классической трапецеидальной формы Power Grip® (рис. 9, a), и уже применялись в промышленности. В связи с возросшими требованиями в отношении передачи нагрузки, защищенности от скачков и уровня шума в настоящее время практически без исключения применяются ремни со скругленным, дугообразным профилем зубьев (например, Power Grip® HTD 2, High Torque Drive, рис. 9, b). По сравнению с зубьями трапецеидальной формы усилия здесь распределяются в зубьях более равномерно, что позволяет избежать концентраций напряжений. Величина шага (см. рис. 10) в большинстве случаев составляет 9,525 мм для дизельных двигателей и 8,00 мм для бензиновых двигателей. Увеличение шага позволяет передавать более высокие усилия, в то время как малый шаг дает преимущества в отношении уровня шума и занимаемого пространства.

Там, где возможно изменение направления вращения (например, в приводах с уравновешивающим валом) могут применяться двухсторонние зубчатые ремни.

Зубчатые колеса для зубчатых ремней описаны в стандарте DIN ISO 9011. Для зубчатого колеса профиль должен быть определен в зависимости от диаметра. Эффективный диаметр PD вычисляется, исходя из количества зубьев и величины

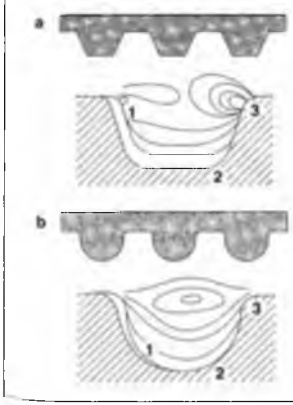
шага. Наружный диаметр зубчатого колеса соответственно уменьшается на величину ***PLD***.

Система привода с зубчатым ремнем

Наиболее важное требование к ременной передаче с использованием зубчатого ремня заключается в том, что она должна синхронизировать положения коленчатого и распределительного валов на протяжении всего срока службы двигателя. Это важное условие, необходимое для достижения оптимального расхода топлива и количества выбросов. За счет правильного выбора материала ремня, использования системы автоматического натяжения и оптимизации динамики системы можно ограничить удлинение ремня в пределах 0,1% его длины. Это позволяет разработать 4-цилиндровые двигатели с рассогласованием положения распределительного вала относительно положения коленчатого вала в пределах от 1 до 1,5°.

Требования к ресурсу зубчатых ремней в настоящее время составляют от 240 000 до 300 000 км, а требования к температурной стойкости – от 120 до 150 °С. Шум, издаваемый зубчато-ременными передачами, неприемлем. К.п.д. зубчато-ременных передач составляет приблизительно 99%.

Рис. 9. Профили зубчатых ремней:
a – зубчатый ремень с трапециедальным профилем зубцов Power Grip®;
b – зубчатый ремень Power Grip® HTD;
1 – зуб ремня; 2 – зубчатое колесо; 3 – область нагрузки



Критерии проектирования

При создании систем приводов механизмов газораспределения используются компьютерные программы, разрабатываемые как самими изготовителями ремней, так и специализированными субподрядчиками.

При этом важными исходными параметрами являются расположение компонентов, т.е. конфигурация привода, кривые крутящего момента компонентов, вычисленные, исходя из этих данных, динамические периферийные усилия и характеристики ремня. Используя эти данные, можно рассчитать и оптимизировать геометрию вашей системы, например, длину ветвей ремня и угол обхвата шкивов, а также динамические характеристики системы.

Рис. 10. Характеристики зубчатого ремня:
a – продольное сечение, b – вид сверху; P – шаг, D – высота головки зуба, W – толщина ребер, B – ширина PLD/2 Эффективное линейное расстояние (половина расстояния от наружного диаметра до эффективной линии)

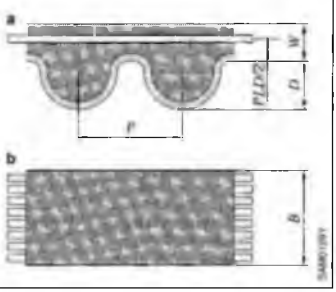
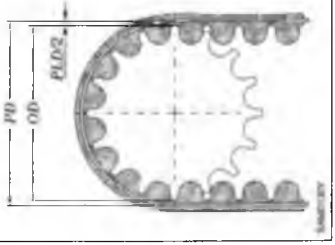


Рис. 11. Характеристики зубчатого колеса:
PD – эффективный диаметр; OD – наружный диаметр, PLD/2 Эффективное линейное расстояние



Рекомендуемые минимальные углы обхвата шкивов:
- коленчатого вала: 150°;
- распределительного вала, топливного насоса высокого давления: 100°;
- шкива привода вспомогательных агрегатов: 90°;
- натяжного ролика: минимум 30°, желательно >70°;
- опорного ролика: 30°.

Периодическое зацепление
Во избежание неравномерного износа ремня важно предотвратить вхождение одних и тех же зубьев ремня в одни и те же впадины зубчатого колеса. Периодичность такого вхождения вычисляется следующим образом:

X,nnn = количество зубьев зубчатого ремня/ количество зубьев зубчатого колеса.

При этом необходимо избегать следующих значений X,nnn:
- X,nnn = X,0; X.5 (следует избегать);
- X,nnn = X,25; X,333; X,666; X,75 (следует избегать).

Длины ветвей ремня
Во избежание возникновения резонансных шумов при оборотах холостого хода важно обеспечить, чтобы длины свободных пробегов ремня не находились в районе 75 и 130 мм.

Минимальные диаметры зубчатых колес и опорных роликов:
- шаг 9,525 мм: 18 зубьев (диаметр 54, 57 мм);
- шаг 8,00 мм: 21 зуб (диаметр 53, 48 мм);
- гладкие опорные ролики: диаметр 52 мм.

Допуски изготовления зубчатых колес и опорных роликов

Концентричность, торцовое биение:
- диаметр от 50 до 100 мм: 0.1 мм.
- диаметр > 100 мм: 0,001 мм на 1 мм диаметра.

Конусность наружного диаметра:
- ≤ 0,001 мм на 1 мм толщины колеса.

Параллельность отверстия зубчатому венцу:
- ≤ 0,001 мм на 1 мм толщины колеса.

Шероховатость поверхности:
- $R_a \leq 1{,}6$ мкм.

Погрешность шага:
- диаметр < 100 мм: ± 0,03 мм между соседними впадинами, максимум 0,10 мм на секторе 90°;
- диаметр 100 - 180 мм: ± 0,03 мм между соседними впадинами, максимум 0,13 мм на секторе 90°;
- диаметр > 180 мм: ± 0,03 мм между соседними впадинами, максимум 0,15 мм на секторе 90°.

Осевое направление
Во избежание схождения ремня с зубчатых колес, его необходимо направлять при помощи, как минимум, одного колеса с фланцами. При этом, во избежание отклонения ремня от требуемого направления, важно обеспечить, чтобы зубчатые колеса с фланцами находились в точности вровень с другими колесами.

Системы натяжения ремней
В современных ременных передачах требуемое высокое натяжение ремня и компенсация увеличения натяжения при возрастании температуры и удлинения ремня обеспечивается натяжными роликами. Конструкция натяжных роликов в значительной степени определяется имеющимся в наличии свободным пространством. Наиболее широко применяются механические, демпфируемые трением компактные натяжители. В случае очень высоких динамических усилий в зубчато-ременных передачах применяются натяжные ролики с гидравлическим натяжителем. За счет асимметричного демпфирования эти устройства демонстрируют очень хорошее демпфирование даже при низких усилиях предварительного натяжения.

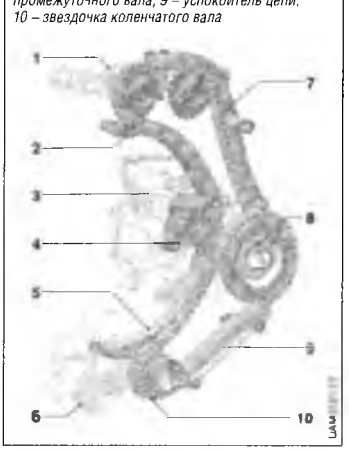
Цепные передачи

Обзор

Для управления клапанами механизма газораспределения служат распределительные валы. Они открывают и закрывают клапаны через толкатели или коромысла. На современных двигателях с верхним расположением клапанов и расположением распределительных валов в головке цилиндров привод распределительных валов осуществляется при помощи ременной или цепной передачи, в то время как распределительные валы нижнего расположения (в блоке циллиндров) соединяются с ведущей шестерней коленчатого вала посредством зубчатой передачи.

Наиболее важными критериями выбора типа привода являются стоимость, занимаемое пространство, легкость технического обслуживания, срок службы и уровень шума. Большое преимущество цепных передач по сравнению с ременными передачами заключается в том, что они не требуют технического обслуживания на протяжении всего срока службы двигателя, в то время как зубчатые ремни требуют периодической регулировки натяжения или замены.

Рис. 1. Цепной привод механизма газораспределения:
1 – распределительные валы, 2 – башмак натяжителя; 3 – топливный насос; 4 – натяжитель цепи, 5 – башмак натяжителя; 6 – коленчатый вал; 7 – успокоитель цепи, 8 – группа звездочек промежуточного вала; 9 – успокоитель цепи; 10 – звездочка коленчатого вала



На современных двигателях привод распределительного вала часто служит также для привода других устройств, таких как масляный насос и топливный насос (см. рис. 1). Поскольку как коленчатый, так и распределительный валы вращаются неравномерно и подвержены крутильным колебаниям, привод испытывает крайне сложные динамические напряжения. Кроме того, момент сопротивления топливного насоса высокого давления испытывает очень большие периодические колебания, что создает дополнительные возмущения, воздействующие на цепную передачу привода механизма газораспределения.

Конструкции цепей

Что касается стандартных цепей, в цепных передачах используются роликовые и втулочные цепи. Существуют также однорядные и двухрядные цепи. Специальным типом цепи является цепь зубчатого типа.

Роликовая цепь

Вращающиеся ролики роликовой цепи (рис. 2, a), надетые на втулки, прокатываются с низким трением по боковым поверхностям зубьев звездочки таким образом, что контакт всегда имеет место в различных точках окружности. Смазка между роликами и втулками помогает снизить уровень шума и демпфировать удары.

Втулочная цепь

В случае втулочной цепи (рис. 2, b) боковые поверхности зубьев звездочки постоянно контактируют с зафиксированными втулками в одной и той же точке, в связи с чем втулки подвергаются дополнительной нагрузке. Поэтому для таких цепей особенно важна хорошая смазка.

При одинаковом шаге и разрывном усилии втулочные цепи имеют большую поверхность соприкосновения, чем соответствующие роликовые цепи, поскольку отсутствие роликов означает, что диаметр пальца может быть увеличен. Большая поверхность соприкосновения дает снижение поверхностного давления и, соответственно, снижение износа в соединениях

Втулочные цепи продемонстрировали высокие рабочие характеристики в приводах распределительных валов на дизельных двигателях, где вследствие повышенного проникновения сажи в моторное масло требуется высокая износостойкость.

Зубчатая цепь

На зубчатой цепи (рис. 2, c) соединительные звенья расположены таким образом, что они могут передавать усилия между цепью и звездочкой, в то время как в случае роликовой или втулочной цепи соединение со звездочкой осуществляется при помощи роликов или втулок.

Зубчатые цепи могут быть изготовлены буквально любой желаемой ширины без необходимости в серьезных конструктивных изменениях. Направляющие звенья, расположенные либо посередине, либо сбоку (на обеих сторонах), служат для предотвращения спадания цепи со звездочки. Еще одним вариантом зубчатой цепи является цепь с зубьями на обеих сторонах, позволяющая также реализовать отрицательный обхват (как на роликовых и втулочных цепях).

Выбор типа цепи

При выборе типа цепи (конструкции и шага) важно, придерживаясь максимального диаметра звездочки, стремиться к тому, чтобы число зубьев было более 18, с тем чтобы уменьшить динамические воздействия, вызываемые эффектом излома. Если это не может быть реализовано конструктивно, рекомендуется перейти на двухрядную цепь с меньшим шагом.

Многолетний опыт продемонстрировал, что некоторые размеры роликовых, втулочных и зубчатых цепей особенно хорошо подходят для приводов механизмов газораспределения.

Требования, предъявляемые к цепям

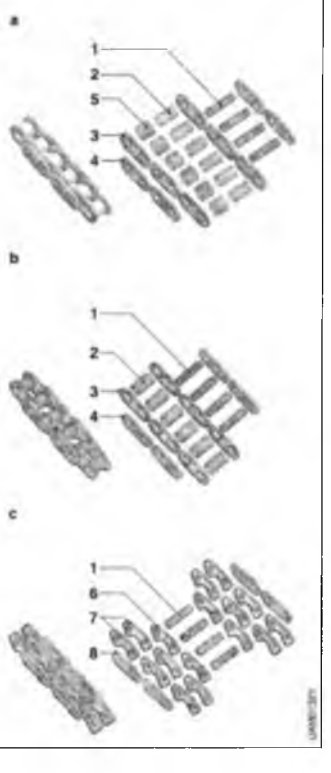
Имеются четыре важных фактора, определяющих рабочие характеристики цепей для приводов механизмов газораспределения:

- предел прочности при растяжении;
- предел усталости;
- износостойкость;
- акустические свойства.

Превышение допустимой статической или динамической разрывной нагрузки может вызвать разрыв цепи. В случае приводов механизмов газораспределения нагрузка является неравномерной, поэтому характеристикой, ограничивающей прочность, является предел усталости. Цепь испытывает динамические нагрузки вследствие пульсаций крутящего момента распределительного вала (валов), топливного насоса и неравномерности вращения коленчатого вала и пульсаций осевого усилия, воздействующего на цепь, вызванных эффектом излома. При этом не должен быть превышен предел усталости цепи, поскольку количество таких изменений нагрузки на протяжении всего срока службы двигателя превышает 10^8 (см. рис. 3).

На современных двигателях с точной синхронизацией и минимальными зазорами между поршнями и клапанами можно достигнуть минимального удлинения цепи вследствие износа. Оптимизация трибо-соединения

Рис. 2. Конструкции цепей:
a – роликовая цепь, b – втулочная цепь, c – зубчатая цепь;
1 – палец; 2 – втулка, 3 – внутреннее звено; 4 – наружное звено, 5 – ролик; 6 – центральное зубчатое звено; 7 – внутреннее зубчатое звено; 8 – направляющее звено



пальцев и втулок цепи позволяет уменьшить удлинение цепи до всего лишь 0,2–0,5 % ее длины после пробега до 350 000 км.

Надлежащая работа цепного привода механизма газораспределения определяется массой и жесткостью цепи, а также демпфированием колебательной системы с несколькими степенями свободы. Под действием возмущений со стороны распределительного вала, коленчатого вала, топливного насоса и т.д., в результате различных сложных взаимодействий в системе могут возникнуть резонансные эффекты, вызывающие очень высокие нагрузки на компоненты привода.

За счет различных мер оптимизации (например, увеличения жесткости цепи при сохранении удельной массы, применения звездочек специальной геометрии, оптимизации гидравлического натяжителя цепи в отношении демпфирования и жесткости) можно сдвинуть точки резонанса в область более высоких оборотов двигателя (или даже за пределы реального диапазона оборотов (см. рис. 4).

Звездочки

Для роликовых, втулочных и зубчатых цепей форма зубьев звездочек стандартизована:
- DIN 8187-1 для роликовых цепей европейского типа;
- DIN 8188-1 для роликовых цепей американского типа;
- DIN 8154 для втулочных цепей со сплошными пальцами;
- DIN 8190 для зубчатых цепей.

Оптимизированная конфигурация формы зубьев столь же важна для безопасной работы привода механизма газораспределения, как, например, износостойкость или усталостная прочность самой цепи.

Стандарт DIN допускает значительную свободу в отношении прецизионной конфигурации зубьев звездочки. Как правило, применяются звездочки с максимальным пространством между зубьями. Благодаря низкой высоте головки зуба и большому пространству между зубьями эта конструкция позволяет цепи без возмущений находить на звездочку и сходить с нее даже при высоких скоростях движения цепи.

В зависимости от доступного свободного пространства применяются дисковые колеса или звездочки с односторонними или двусторонними ступицами, а также звездочки пластинчатого типа. Выбор материала зависит от доступного пространства, условий работы и величины мощности, передаваемой цепной передачей (см. рис. 5).

Применяются звездочки, изготовленные из углеродистой и легированной стали и колеса, изготовленные из керамических материалов. Также применяются колеса, изготавливаемые посредством прецизионной штамповки или механической обработки с последующей

Рис. 3. Предел усталости втулочных и роликовых цепей:
1 – втулочная цепь для двигателей с прямым впрыском топлива;
2 – втулочная цепь для форкамерных дизельных двигателей;
3 – роликовая цепь для приводов механизмов газораспределения бензиновых двигателей;
4 – роликовая цепь для привода масляного насоса

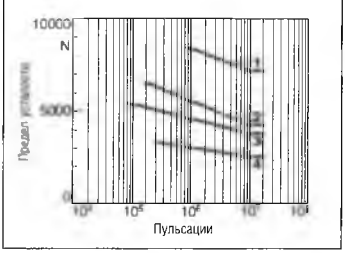
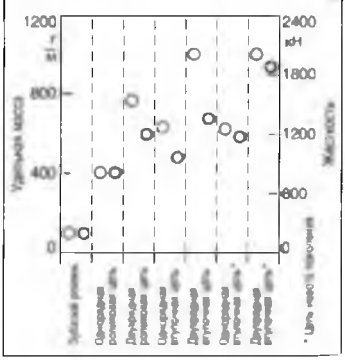


Рис. 4. Характеристические значения цепей: жесткость и масса



термообработкой, зависящей от используемого материала. Решающую роль в выборе материала играют доступное пространство и последовательность сборки.

Натяжители и успокоители цепей

Применение постоянно действующих натяжителей и успокоителей (см. рис. 1), точно согласованных с данным двигателем, позволяет оптимизировать цепную передачу таким образом, что срок ее службы будет соответствовать сроку службы двигателя.

Натяжитель цепи

Натяжитель цепи (гидравлический) выполняет в приводе механизма газораспределения ряд задач. С одной стороны, цепь при любых условиях работы должна иметь надлежащее натяжение ведомой ветви при определенной нагрузке, даже в случае удлинения вследствие износа, возникающего в процессе эксплуатации. Снижение вибрации до приемлемого уровня осуществляется фрикционным или вязкостным демпфирующим элементом.

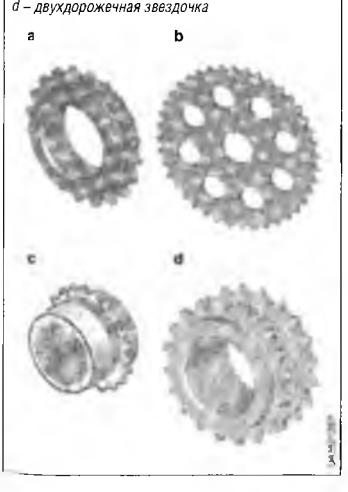
В приводах масляных насосов, работающих в условиях низких нагрузок, как правило, применяются механические натяжители цепи без дополнительного гидравлического демпфирования. В особых случаях эти механические натяжители цепи могут отсутствовать.

Успокоители цепи

Иногда в качестве натяжительных и направляющих элементов используются простые успокоители, изготовленные из пластмассы или металла (алюминия или листовой стали), плоские или изогнутые, в зависимости от трассы цепи. В последнее время применяются недорогие, литые под давлением, пластмассовые успокоители двухкомпонентной конструкции (основа и фрикционная накладка).

При этом, в случае натяжительных успокоителей фрикционный слой не содержащего стекловолокна полиамида напыляется или наклепывается на основу из термостойкого полиамида с содержанием стекловолокна от 30 до 50%. Для направления цепи используются однокомпонентные пластмассовые направляющие скольжения.

Рис. 5. Звездочки:
a – звездочка коленчатого вала из керамического материала;
b – звездочка распределительного вала, изготовленная методом прецизионной штамповки;
c – звездочка с уплотненной поверхностью;
d – двухдорожечная звездочка



Разъемные соединения

Позитивные или геометрически замкнутые соединения

Принцип действия

Позитивные или геометрически замкнутые соединения имеют задачу передачи сил, которые сами по себе обеспечивают контакт через сопрягающиеся поверхности за счет их геометрической формы. Силы всегда передаются в направлениях, перпендикулярных сопрягающимся поверхностям, что вызывает в основном напряжения сжатия или сдвига.

Геометрическое замыкание обычно создает легкоразъемное соединение, поскольку, как правило, между валом и отверстием имеет место посадка с зазором или переходная посадка. В зависимости от выбора посадки, во время работы соединения могут происходить относительные осевые перемещения. При необходимости они должны быть исключены при помощи подходящих стопорных устройств (например, стопорного кольца по стандарту DIN 471 [1]).

Шпоночные соединения с призматическими и сегментными шпонками

Шпоночные соединения с призматическими шпонками (рис. 1, a) применяются для устойчивых к кручению соединений ременных шкивов, зубчатых колес, ступиц соединительных муфт и т.п. с валами. Призматические шпонки иногда используются для закрепления фрикционных соединений или закрепления деталей в определенном положении относительно оси вращения.

Таблица 1: Условные обозначения величин и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
D	Диаметр	мм
F	Сила	Н
K_A	Коэффициент условий применения (эксплуатационный коэффициент)	–
M_t	Момент силы (крутящий момент)	Н·м
b	Ширина	мм
D	Диаметр	мм
h	Высота	мм
I	Количество поверхностей сдвига	–
l	Длина	мм
l_{tr}	Опорная длина призматической шпонки	мм
n	Количество ведущих элементов	–
p	Поверхностное давление	Н/мм²
t_1	Глубина паза (в вале)	мм
t_2	Глубина паза (в ступице)	мм
σ_b	Изгибающее напряжение	Н/мм²
τ_a	Напряжение сдвига	Н/мм²
Φ	Отношение площадей контактных поверхностей	–

В автомобильных конструкциях для этой цели в основном используются более дешевые сегментные шпонки (рис. 1, b), круглая сторона которых вставляется в вал. Такие соединения служат для передачи небольших крутящих моментов.

В случае соединений с призматическими шпонками поверхности паза прилегают к поверхностям призматической шпонки. При этом имеет место зазор (люфт) между

Рис. 1. Позитивные или геометрически замкнутые соединения:
a – шпоночное соединение с призматической шпонкой, b – шпоночное соединение с сегментной шпонкой. Символы приведены в табл. 1

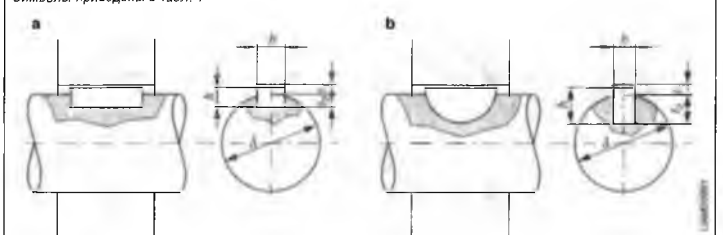


Таблица 2. Допуски ширины шпоночных пазов

Плотная посадка	Неподвижная посадка	Свободная посадка	Скользящая посадка
в ступице	*P* 9	*N* 9	*h*8
в вале	*P* 9	*J* 9	*D* 10

задней стороной призматической шпонки и основанием паза. Это означает, что усилия передаются исключительно через боковые поверхности призматической шпонки.

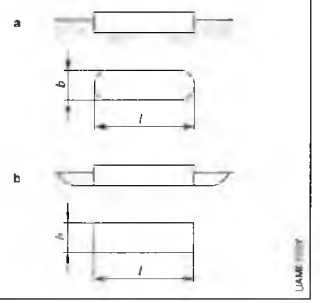
Что касается ширины призматической шпонки, здесь предусмотрено поле допуска *h* 9 (шпонок по стандарту DIN 68802 [2]). Для ширины паза *b* применимы поля допуска, указанные в табл. 2. Если ступица должна перемещаться по валу в продольном направлении (например, шестерня в механической коробке передач), должна использоваться скользящая посадка. Применяются призматические шпонки скругленной (форма А) и прямоугольной (форма В) формы (см. рис. 2). Формы и размеры шпонок в зависимости от диаметра вала указаны в стандарте DIN 6885 [3] (см. табл. 3).

На практике призматические шпонки рассчитаны только на поверхностное давление. Если $p \leq p_{perm}$, требуемая длина несущей части призматической шпонки равна:

$$l_{tr} = \frac{2 K_A M_t}{d (h - t_1) n \varphi p_{perm}}$$

Для скругленных призматических шпонок (форма А) длина шпонки равна $l = l_{tr} + b$.

Рис. 2. Формы призматических шпонок:
a – форма A; b – форма B.
Символы приведены в табл. 1



Для прямоугольных шпонок (форма В) она составляет $l = l_{tr}$. Для допустимых поверхностных давлений стандарт указывает $p_{perm} = 0{,}9\ R_{e\,min}$, где $R_{e\,min}$ – минимальный предел текучести материала вала, ступицы или шпонки. При наличии одной призматической шпонки ($n = 1$) отношение площадей поверхностей контакта $\varphi = 1$, а при наличии двух шпонок оно составляет $\varphi = 0{,}75$.

Профильные соединения вала со ступицей

Вместо установки нескольких призматических шпонок в пазы вала можно применить вал, поперечное сечение которого имеет многоугольную форму. При этом отверстие в сту-

Таблица 3. Размеры призматических шпонок по стандарту DIN 6885

Диаметр вала *d*		Ширина × высота	Глубина паза		Длина
более, мм	до, мм	*b* × *h*, мм	t_1, мм	t_2, мм	*l*, мм
6	8	2 × 2	1,2	1,0	6 – 20
8	10	3 × 3	1,8	1,4	6 – 36
10	12	4 × 4	2,5	1,8	8 – 45
12	17	5 × 5	3,0	2,3	10 – 56
17	22	6 × 6	3,5	2,8	14 – 70
22	30	8 × 7	4,0	3,3	18 – 90
30	38	10 × 8	5,0	3,3	22 – 110
38	44	12 × 8	5,0	3,3	28 – 140
44	50	14 × 9	5,5	3,8	36 – 160
50	58	16 × 10	6,0	4,3	45 – 180
58	65	18 × 11	7,0	4,4	50 – 200
65	75	20 × 12	7,5	4,9	56 – 220
75	85	22 × 14	9,0	5,4	63 – 250
85	95	25 × 14	9,0	5,4	70 – 280
95	110	28 × 16	10,0	6,4	80 – 320
Длины призматических шпонок в мм		6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 220, 250, 280, 320			

пице должно иметь соответствующую форму. Профильные валы также используются, если ступица должна иметь возможность перемещаться по валу в продольном направлении. (как, например в конструкции рулевой колонки с регулировкой вылета рулевого колеса). Профильные соединения имеют преимущество, заключающееся в том, что для передачи момента они не требуют дополнительных сепараторов (призматических шпонок). Ступица центрируется по поверхности цилиндра (минимальному диаметру вала) или по боковым поверхностям ведущих элементов. За счет внутренней центровки может быть достигнуто очень плавная работа соединения (см. табл. 4).

Центровка по боковым поверхностям обеспечивает очень малый окружной зазор. Поэтому она очень хорошо подходит для работы соединения в условиях рывков и переменных крутящих моментов. Так же как для призматических шпонок конструкция разрабатывается, исходя из величины поверхностного давления.

Болтовые и штифтовые соединения

Болтовые и штифтовые соединения представляют собой простой и недорогой способ соединения двух или более компонентов. Они относятся к давно применяющимся и широко используемым типам соединений.

Болтовые соединения

Болтовые соединения в основном используются в качестве соединений в рычажных механизмах (см. табл. 5), а также соединений серег, звеньев цепей и соединительных тяг, а также в качестве осей опорных колец крыльчаток, роликов, рычагов и т.д. Поскольку в этих соединениях имеют место относительные перемещения частей, как минимум одна часть должна быть подвижной. Преобладающими нагрузками являются поверхностное давление (см. табл. 6) и сдвиг. Изгибающее напряжение в большинстве случае пренебрежимо мало. Оно является заметным только в случае относительно длинных по сравнению с диаметром болтовых соединений.

Штифтовые соединения

Штифты подходят для неподвижных соединений ступиц, рычагов и установочных колец на валах и осях. Они обеспечивают точное позиционирование двух частей относительно друг друга, а также могут использоваться в качестве направляющих для пружин и т.д. (см. табл. 5). Поскольку они устанавливаются в отверстия с прессовой посадкой, все части являются неразъемными.

Список литературы

[1] DIN 471: Circlips (retaining rings) for shafts – Normal type and heavy type.
[2] DIN 6880: Bright key steel – dimensions, permissible variations, weights.
[3] DIN 6885: Drive type fastenings without taper action; parallel keys.
[4] DIN 6892: Drive type fastenings without taper action – Parallel keys – Calculation and design.
[5] Haberhauer/Bodenstein: Maschinenelemente, 15th Edition, Springer-Verlag 2008.
[6] Kollmann: Welle-Nabe-Verbindungen, Springer-Verlag 1984.

Таблица 4. Профильные соединения вала со ступицей

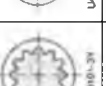
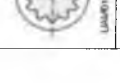
Наименование	Стандарт	Иллюстрация	Ведущий элемент	Центровка	Отношение площадей контактных поверхностей
Шлицевой вал	ISO 14 DIN 5464		Призматический ведущий элемент	Внутренняя	$\varphi = 0{,}75$
				Боковая	$\varphi = 0{,}9$
Зубчатый вал с рифленым венцом	DIN 5481		Рифленый зубчатый венец	Боковая	$\varphi = 0{,}5$
Зубчатый вал с эвольвентным зубчатым венцом	DIN 5480 DIN 5482		Эвольвентный зубчатый венец	Боковая	$\varphi = 0{,}75$

Таблица 5. Болтовые и штифтовые соединения

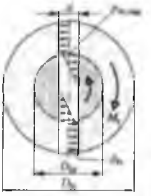
Наименование	Иллюстрация	Расчетные формулы
Шарнирное соединение		Поверхностное давление в вилке: $p_G = \frac{F}{2\,b_1\,a} \le p_{perm}$ Поверхностное давление в тяге: $p_S = \frac{F}{b\,d} \le p_{perm}$ Поверхностное давление в пальце: $\tau_S = \frac{4\,F}{i\,\pi\,d^2} \le \tau_{S,perm}$
Сквозное штифтовое соединение		Поверхностное давление в валу: $p_{W,max} = \frac{3\,M_t}{d\,D_W^2} \le p_{perm}$ Поверхностное давление в ступице: $p_N = \frac{4\,M_t}{d\,(D_N^2 - D_W^2)} \le p_{perm}$ Поверхностное давление в пальце: $\tau_S = \frac{4\,M_t}{D_W\,\pi\,d^2} \le \tau_{S,perm}$
Направляющий штифт		Максимальное давление: $p_{max} = p_b + p_d = \frac{F}{d\,s}\left(1 + 6 \cdot \frac{h + s\sqrt{2}}{s}\right) \le p_{perm}$ Напряжение изгиба в точке зажима: $\sigma_b = \frac{32\,F\,h}{\pi\,d^3} \le \sigma_{b,perm}$ Напряжение сдвига в точке зажима: $\tau_a = \frac{4\,F}{\pi\,d^2} \le \tau_{S,perm}$

Таблица 6. Допустимое среднее поверхностное давление для болтовых и штифтовых соединений

Неподвижные посадки			Скользящие посадки	
Материал	Среднее поверхностное давление		Пара материалов	Среднее поверхностное давление
	статическое	динамическое		
	p_{perm}, Н/мм²	p_{perm}, Н/мм²		p_{perm}, Н/мм²
Серый чугун	70	50	Сталь / серый чугун	5
S 235 (St 37)	85	65	Сталь / углеродистая сталь	7
S 295 (St 50)	120	90	Сталь / бронза	8
S 335 (St 60)	150	105	Закаленная сталь / бронза	10
S 369 (St 70)	180	120	Закаленная сталь / закаленная сталь	15

Фрикционные соединения

Принцип действия

Для фрикционных соединений используются прессовые посадки (поверхности трения являются зонами действия), при которых собираемые детали находятся в прямом контакте. Поверхностное давление p может создаваться усилиями, прилагаемыми болтами, шпонками, упругими распорами или самими компонентами. Результирующая нормальная сила $F_N = pA$ (с поверхностью трения A) создает силу трения F_R, которая противодействует перемещению под действием внешних сил.

Прессовая посадка

Применение

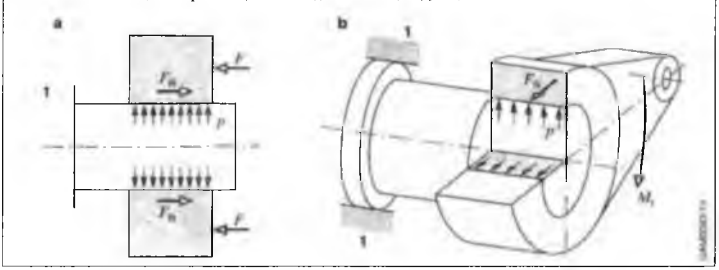
Для прессовой посадки (посадки гладких циллиндрических соединений с натягом) требуемое поверхностное давление создается за счет упругой деформации вала и ступицы. «Посадка с натягом» представляет собой спаривание сопрягающихся цилиндрических деталей, имеющих натяг перед сборкой (см. рис. 2).

Поскольку прессовые посадки легко выполняются и могут передавать даже прерывистые или переменные крутящие моменты, они подходят для соединений цилиндрических поверхностей, которые не должны рассоединяться в дальнейшем (например, посадка шестерни на вал, колеса на ось или втулки в корпус).

Таблица 1: Условные обозначения величин и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
a	Площадь (поверхности трения)	мм²
C	Конусность	
D	Диаметр	мм
e	Модуль упругости (модуль Юнга)	Н/мм²
F	Сила	Н
F_a	Осевое усилие	Н
F_N	Нормальная сила	Н
F_R	Сила трения	Н
K_A	Коэффициент условий применения	–
M_t	Момент силы (крутящий момент)	Н · м
$M_{t\ nom}$	Номинальный момент нагрузки	Н · м
Q	Соотношение диаметров	–
R_e	Предел текучести	Н/мм²
R_m	Предел прочности на разрыв	Н/мм²
R_z	Шероховатость поверхности	мм
S_B	Коэфф.запаса на разрыв	
S_F	Коэфф. запаса на текучесть	
U	Допуск	мм
Z	Припуск	мм
b	Ширина ступицы	мм
D	Диаметр	мм
l	Длина конуса или рычага	мм
n	Количество болтов	
p	Поверхностное давление	Н/мм²
T	Температура	°C
α	Угол конуса	°
α_A	Коэффициент линейного расширения наружной детали	10^{-6}/K
α_I	Коэффициент линейного расширения внутренней детали	10^{-6}/K
μ	Коэффициент трения	
ν	Коэффициент Пуассона	
ξ	Удельный припуск	мм³/Н
σ_{perm}	Допустимое напряжение	Н/мм²

Рис. 1. Фрикционные соединения:
a – соединение, напряженное в осевом направлении; b – соединение, напряженное в окружном направлении; 1 – удерживаемая сторона соединения, F – сила; F_R – сила трения; p – поверхностное давление; M_t – крутящий момент



Упругая конструкция посадок с натягом цилиндрических деталей

Прессовая посадка должна быть рассчитана таким образом, чтобы обеспечить наличие минимального поверхностного давления p_{min}, необходимого для передачи максимальных возникающих напряжений, но в то же время была исключена возможность превышения максимального поверхностного давления p_{max} во избежание избыточного напряжения компонентов.

В принципе возможны две цели вычислений: определение требуемой посадки при данном напряжении (см. табл. 2), или определение допустимого напряжения при данной посадке (см. табл. 3).

Соотношения диаметров:
$Q_A = D_F / D_{Aa}$ и
$Q_I = D_{Ii} / D_F$

и удельный припуск [1]

$$\xi = D_F \left| \frac{1}{E_I} \left(\frac{1+Q_I^2}{1-Q_I^2} - \nu_I \right) + \frac{1}{E_A} \left(\frac{1+Q_A^2}{1-Q_A^2} + \nu_A \right) \right|$$

могут быть использованы для расчета посадок в соответствии с их функциями и требуемой безопасностью компонентов.

В формулу вычисления диаметра соединения D_F входит номинальный диаметр. При соединении деталей с натягом происходит пластичное выравнивание шероховатостей на поверхности деталей. В соответствии со стандартом DIN 7190 [2] при расчете учитывается сглаживание двух поверхностей со средней высотой неровностей профиля 40 % R_{zI} (вала) и R_{zA} (отверстия).

Максимальные напряжения возникают в областях внутренних диаметров полого вала и ступицы. Сплошные валы некритичны и обычно не требуют расчета.

Таблица 2. Определение посадок для данного напряжения[1]

Заданное напряжение M_t или F_a	$\sigma_{perm} = R_e / S_F$ или σ_{perm} = заданное R_m / S_B
Требуемая посадка: $p_{min} = \frac{\sqrt{F_a^2 + \frac{4 M_{t\,nom}^2}{D^2}}}{\mu \pi D_F b} K_A$	Допустимая посадка в ступице. $p_{max} = \left(1 - Q_A^2\right) \sigma_{perm} / \sqrt{3}$ Допустимая посадка в полом вале: $p_{max} = \left(1 - Q_I^2\right) \sigma_{perm} / \sqrt{3}$
Требуемый припуск: $Z_{min} = p_{min}\, \xi$	Допустимый припуск: $Z_{max} = p_{max}\, \xi$
Требуемый натяг: $U_{min} = Z_{min} + 0{,}8\ (R_{zI} + R_{zA})$	Допустимый натяг. $U_{max} = Z_{max} + 0{,}8\ (R_{zI} + R_{zA})$
Выберите посадки в соответствии со стандартом ISO с $U_k \geq U_{min}$ и $U_g \leq U_{max}$	

Рис. 2. Прессовые посадки:
a – после посадки b – перед посадкой;
1 – внутренняя деталь (вал); 2 – наружная деталь (ступица);
F_R – сила трения; p – поверхностное давление; M_t – крутящий момент; b – ширина ступицы, D_F – диаметр соединения; D_{Ie} – наружный диаметр вала; D_{Ii} – внутренний диаметр вала; D_{Aa} – наружный диаметр ступицы, D_{Ai} – внутренний диаметр ступицы

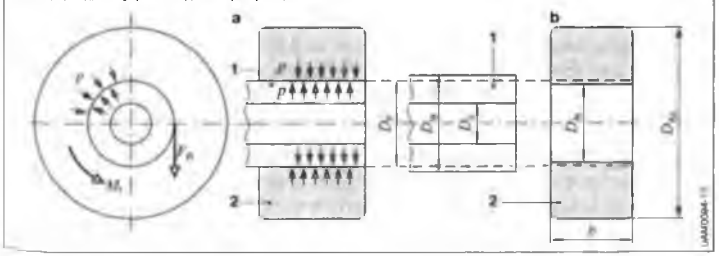


Таблица 3. Определение напряжения для данной посадки

Минимальный заданный натяг U_k	Максимальный заданный натяг U_g
Минимальный припуск: $Z_k = U_k - 0{,}8\,(R_{zI} + R_{zA})$	Максимальный припуск: $Z_g = U_g - 0{,}8\,(R_{zI} + R_{zA})$
Минимальное давление: $P_k = \frac{Z_k}{\xi}$	Максимальное давление: $P_g = \frac{Z_g}{\xi}$
Допустимое напряжение: $M_t = 0{,}5 p_k \mu \pi D_F^2 b$ (только M_t) $F_a = p_k \mu \pi D_F b$ (только F_a) $M_t = \frac{D_F}{2}\sqrt{(p_k \mu \pi D_F b)^2 - F_a^2}$ (F_a задана) $F_a = \sqrt{p_k \mu \pi D_F b - \frac{4M_t}{D_F^2}}$ (M_t задан)	Коэффициент запаса для ступицы $S_F = \frac{1-Q_a^2}{\sqrt{3}\,p_g} R_e$ или $S_B = \frac{1-Q_a^2}{\sqrt{3}\,p_g} R_m$ Коэффициент запаса для полого вала: $S_F = \frac{1-Q_i^2}{\sqrt{3}\,p_g} R_e$ или $S_B = \frac{1-Q_i^2}{\sqrt{3}\,p_g} R_m$

Сборка

В зависимости от метода сборки существуют два типа прессовой посадки: линейная и поперечная. Линейная прессовая посадка производится посредством «холодной» сборки при комнатной температуре. Требуемые для этого большие усилия прессования обычно создаются при помощи гидростатических прессов. Скорость запрессовки не должна превышать 2 мм/с. Усилие прессования вычисляется по формуле:

$$F_\varphi = \frac{(U_g - 0{,}8\,(R_{zI} + R_{za}))\,\mu \pi D_F b}{\xi}$$

Перед выполнением поперечной прессовой посадки наружная деталь расширяется посредством нагрева, или диаметр внутренней детали уменьшается посредством ее переохлаждения, что позволяет собрать детали без напряжений. Если нагревается наружная деталь,то при охлаждении она обжимает внутреннюю деталь (горячая посадка). Если охлаждается внутренняя деталь, при нагреве до комнатной температуры она расширяется (посадка с охлаждением охватываемой детали). Чтобы сборка без напряжений была возможна, необходимо обеспечить зазор в соединении равный $\Delta D = 0{,}001 \cdot D$ (см. табл. 4).

Температура, требуемая для горячей посадки:

$$t_a = t_u + \frac{U_g + XD}{\alpha_1 D_F}$$

Температура, требуемая для посадки с охлаждением охватываемой детали:

$$t_a = t_u - \frac{U_g + XD}{|\alpha_1|\ D_F}$$

Таблица 4. Коэффициент Пуассона, модуль упругости и коэффициент линейного расширения металлических материалов

Материал	Коэффициент Пуассона ν	Модуль упругости E, Н/мм^2	Коэффициент линейного расширения α, 10^{-6}/K	
			Нагрев	Охлаждение
Серый чугун	0,24	100 000	10	–8
Ковкий чугун	0,25	90 000 – 100 000		
Сталь	0,3	200 000 – 235 000	11	–8,5
Бронза	0,35	110 000 – 125 000	16	–14
Красная латунь	0,35 - 0,36	110 000 – 125 000	17	–15
CuZn	0,36	80 000 – 125 000	18	–16
$MgAl_8Zn$ AlMgSi	0,3 0,34	65 000 – 75 000	23	–18

Конусное соединение

Применение

Конусное соединение (конусная посадка с натягом) пригодно для передачи динамических усилий и моментов. Эти соединения в основном используются для крепления деталей на концах валов (например шкива генератора). Они имеют следующие преимущества: могут быть подтянуты, легко разнимаются, не ослабляют вал и дают очень хорошую центровку (т.е. отсутствует дисбаланс).

Недостатками являются высокие производственные затраты и отсутствие возможности регулировки положения в осевом направлении. При этом применимы следующие выражения (см. рис. 3):

конусность $C = \frac{(d_1 - d_2)}{l}$,

угол конуса $\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{(d_1 - d_2)}{2l}$

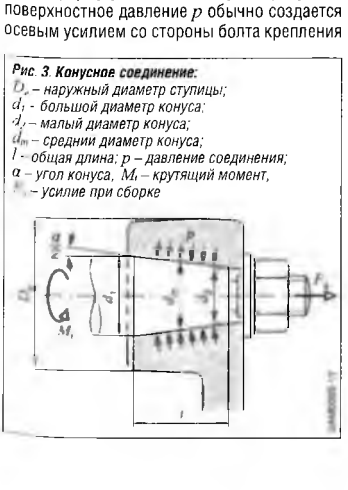
В качестве руководящих указаний приведены следующие значения (DIN 254 [3], DIN 406 [4]):

$C = 1:5$ – соединение разнимается легко;
$C \approx 1:10$ – соединение разнимается с трудом;
$C = 1:20$ – для держателя спирального сверла (конус Морзе).

Работа системы

Эффективная область конусного соединения имеет форму усеченного конуса. Требуемое поверхностное давление p обычно создается осевым усилием со стороны болта крепления

Рис. 3. Конусное соединение:
D_a – наружный диаметр ступицы;
d_1 - большой диаметр конуса;
d_2 – малый диаметр конуса;
d_m – средний диаметр конуса;
l - общая длина; p – давление соединения;
α – угол конуса, M_t – крутящий момент,
F_a – усилие при сборке



F_a. Соотношение между осевым усилием F_a и передаваемым моментом M_t выражается следующим уравнением:

$$F_a \geq \frac{2K_A M_{t\,\text{расч}}}{\mu_a d_m}\left(\sin\frac{\alpha}{2} + \mu_A \cos\frac{\alpha}{2}\right)$$

Это выражение учитывает возможное различие коэффициентов трения μ_a в окружном направлении и μ_a в осевом направлении. Если для разъема соединения требуется сила выталкивания (F_a становится отрицательной), имеет место самостопорение. Это означает, что после посадки крутящий момент может передаваться даже при снятом болте крепления. В отличие от этого, при соединении без самостопорения давление между эффективными областями после снятия осевого усилия исчезает. Условие самостопорения заключается в следующем:

$$\frac{\alpha}{2} \leq \arctan\mu_a$$

Безопасность компонентов

Критичным компонентом является ступица. Она рассчитывается как открытый, толстостенный полый цилиндр. Если $Q = d_m / D_a$, в отношении безопасности ступицы с заданной упругостью, в соответствии с модифицированной теорией напряжений сдвига имеет место следующее выражение:

$$S_F = \frac{1 - Q^2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\left(\sin\frac{\alpha}{2} + \mu_A \cos\frac{\alpha}{2}\right)\pi d_m l}{F_{a\,\text{max}}}.$$

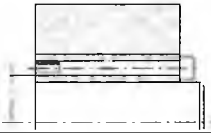
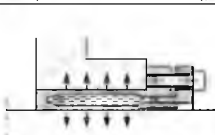
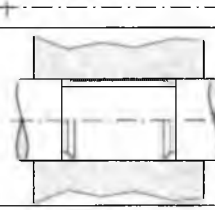
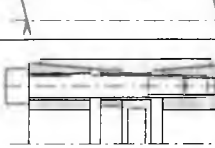
Соединения с зажимным конусом

Требуемое поверхностное давление в эффективных областях может быть также приложено при помощи упругих распоров (см. табл. 5). Большое преимущество таких соединений заключается в том, что они могут использоваться для надежного крепления ступиц, зубчатых колес, соединительных муфт и т.д. на гладких цилиндрических валах. В отличие от цилиндрических посадок с натягом эти соединения позволяют свободно регулировать положение деталей в осевом и окружном направлениях и кроме того легко разнимаются. Поэтому они особенно хорошо подходят для ступиц (например, шкивов ремней), которые требуют регулировки положения и/или периодической замены. Их недостатками являются большое требуемое пространство и высокая стоимость. Обычно они рассчитываются в соответствии с указаниями изготовителя (см. каталоги изготовителей и табл. 5).

Зажимы

В случае использования зажимов внешние усилия, необходимые для создания требуемого поверхностного давления, прилагаются в основном при помощи болтов. Соединения с секционными или разрезными ступицами в основном используются в случаях низких и относительно стабильных крутящих моментов. Их преимущество заключается в том, что положение ступицы легко регулируется как в осевом, так и в окружном направлениях. Они представляют собой очень легкий способ крепления колес или рычагов на гладких валах. Существуют также самостопорящиеся зажимы. Здесь наклонная сила F_K создает краевые давления в областях A и B (см. табл. 6), предотвращающие осевое смещение.

Таблица 5. Соединения с зажимным конусом

Обозначение	Иллюстрация	Описание
Зажимная гильза (Spreth)		Для увеличения наружного диаметра зажимной гильзы и уменьшения внутреннего диаметра прилагается осевое усилие. Опасность ослабления под действием динамических нагрузок снижается за счет использования длинных болтов.
Гидравлическая пружинная цанга с полой оболочкой (Lenze)		Для создания давления в тонкостенном полом цилиндре прилагается осевое усилие. Благодаря равномерному распределению давления, пружинная цанга является самоцентрирующейся, что обеспечивает высокоточное вращение При высоких температурах следует учитывать тепловое расширение напорной жидкости.
Подкрепляющее кольцо (Oechsle)		Подкрепляющие кольца являются разрезными и изготавливаются из тонкого рифленого листового металла Требуемое начальное усилие обеспечивается за счет принудительной деформации упругого соединительного элемента Они могут компенсировать относительно большие допуски на механическую обработку, тепловое расширение и передавать значительные крутящие моменты.
Звездообразная шайба (Ringspann)		Звездообразные шайбы представляют собой тонкостенные, плоские конические детали с радиальными прорезями. Начальное осевое усилие за счет принудительной деформации трансформируется в 5-10-кратное радиальное усилие. Звездообразные шайбы не осуществляют центрирования.
Зажимные конусные кольца (Ringfeder)	1 – предварительное центрирование 	Зажимные конусные кольца включают два коаксиально расположенных конических кольца. Радиальное предварительное напряжение достигается за счет деформации колец в осевом направлении. Зажимные конусные кольца не центрируются. Они не являются самостопорящимися, поэтому соединение является легкоразъемным.
Набор зажимных конусов (Bikon)		Осевая деформация создается болтами, включенными в комплект Зажимные конусы обеспечивают высокую точность и могут передавать очень высокие моменты, особенно при наличии нескольких пар эффективных областей

Шпоночные соединения

Продольные шпоночные соединения

Односторонняя радиальная деформация достигается посредством забивания стандартизованной шпонки (угол шпонки = 0,57°) между валом и ступицей. Однако, вследствие неточной сборки («молотковая» сборка) может возникнуть эксцентриситет, поэтому применение таких соединений ограничено.

Круговые шпоночные соединения

Шпоночное соединение нового типа имеет трехсекционный профиль (см. рис. 4). Три круговых шпонки располагаются по окружности на цилиндрической поверхности вала (внутренняя часть). Ступица (наружная часть) содержит такое же количество соответствующих шпонок в цилиндрическом отверстии. В результате кручения возникает радиальная деформация, позволяющая передавать высокие осевые и радиальные усилия в любом направлении.

В отличие от прессовых посадок, круговые шпоночные соединения являются разъемными. Они используются, например, для соединения валов со ступицами на распределительных валах и в иных шарнирах автомобиля.

Список литературы

[1] Haberhauer/Bodenstein: Maschinenelemente, 15th Ed., Springer-Verlag 2008.
[2] DIN 7190: Interference fits. Calculation and design rules.
[3] DIN 254: Geometrical product specifications (GPS) – Series of conical tapers and taper angles.
[4] DIN 406: Technical drawings; dimensioning.
[5] Kollmann: Welle-Nabe-Verbindungen, Springer-Verlag 1984.
[6] Dubbel, Taschenbuch f r den Maschinenbau, 22nd Ed., Springer-Verlag 2007.

Рис. 4. Трехсекционный шпоночный профиль

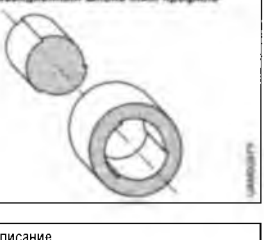
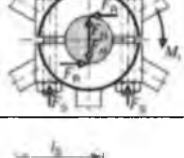
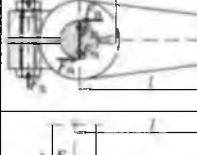
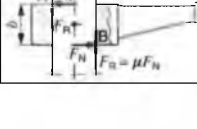


Таблица 6. Зажимы

Обозначение	Иллюстрация	Описание
Зажим с разделенной ступицей.		Передаваемый момент: $M_t = nF_S\mu\frac{\pi}{2}D_F$. n Количество болтов, F_S Усилие, создаваемое болтом, F_R Сила трения, F_N Нормальная сила, M_t Момент.
Зажим с разрезной ступицей.		Передаваемый момент: $M_t = nF_S\mu\frac{\pi}{2}D_F\frac{l_S}{l_N}$ n Количество болтов, F Сила, F_S Усилие, создаваемое болтом, F_R Сила трения, F_N Нормальная сила, M_t Момент, l_S Плечо рычага болта, l_N Плечо рычага центра ступицы.
Самостопорящийся зажим (принцип резьбового зажима).		Условия самостопорения: $\frac{l}{b} \approx \frac{1}{2\mu}$ F Сила, F_R Сила трения, F_N Нормальная сила, μ Коэффициент трения, b Ширина ступицы, A, B Точки контакта

Резьбовые крепежные детали

Основные принципы

Работа системы

Резьбовые крепежные детали включают винты и болты. Они служат для создания надежных соединений, которые могут разъединяться неограниченное число раз. Назначением винтов и болтов является сдавливание сопрягающихся деталей таким образом, чтобы статические или динамические силы в процессе работы не вызывали смещения деталей относительно друг друга.

При затяжке или ослаблении крепежной детали имеет место вращательное движение. За один полный оборот крепежной детали происходит осевое смещение P, соответствующее шагу резьбы. Если линию резьбы развернуть вокруг цилиндра, имеющего диаметр d_2, это даст прямую линию с углом наклона в продольном направлении $\varphi = \arctan(P/(\pi d_2))$.

Как правило, крепежные детали имеют правую резьбу (прямая линия поднимается вправо). В некоторых случаях требуется использовать болты с левой резьбой.

Таблица 1: Условные обозначения величин и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
A	Площадь поперечного сечения	мм²
A_S	Площадь напряжения	мм²
D_{Km}	Эффективный диаметр для момента трения в опорной поверхности головки болта или гайки	мм
E	Модуль упругости (модуль Юнга)	Н/мм²
F_A	Осевое рабочее усилие	Н
F_K	Усилие сжатия	Н
F_M	Предварительный натяг при сборке	Н
F_N	Нормальная сила	Н
F'_N	Составляющая нормальной силы в плоском многоугольнике сил	Н
F_{PA}	Дополнительная сила, действующая на соединенные детали	Н
F_Q	Поперечное усилие, рабочее усилие, направленное перпендикулярно к оси крепежной детали	Н
F_S	Сила, действующая на крепежную деталь	Н
F_{SA}	Дополнительная сила, действующая на крепежную деталь	Н
F_V	Предварительный натяг	Н
F_z	Потеря предварительного натяга вследствие осаждения	Н
M_A	Момент затяжки	Нм
M_G	Эффективный момент затяжки компонента в резьбе	Нм
M_{KR}	Момент трения головки болта	Нм
M_L	Момент освобождения	Нм
P	Шаг резьбы	мм
R_e	Предел текучести	Н/мм²
$R_{p0,2}$	0,2 % предела текучести	Н/мм²
R_P	Упругая жесткость напряженных частей (плит)	Н/мм
R_S	Упругая жесткость крепежной детали	Н/мм
R_z	Шероховатость поверхности	мкм
W_t	Момент сопротивления сечения скручиванию	мм³
d	Номинальный диаметр резьбы	мм
d_2	Диаметр боковой стороны профиля резьбы	мм
d_3	Диаметр резьбовых впадин	мм
d_h	Диаметр отверстий в напряженных частях	мм

Обозначение	Величина	Единица измерения
d_w	Наружный диаметр плоской опорной поверхности головки болта или гайки	мм
f_A	Упругое линейное расширение на F_A	мм
f_{PV}	Упругое линейное расширение напряженных частей на F_V	мм
f_{SV}	Упругое линейное расширение крепежной детали на F_V	мм
f_z	Контактное напряжение	мм
i	Количество пар фрикционных поверхностей	–
l	Длина	мм
m	Высота гайки или полезная длина резьбы	мм
n	Коэффициент приложения силы	–
n_S	Количество крепежных деталей	–
α	Угол наклона боковой стороны резьбы	°
α_A	Коэффициент затяжки	
μ_G	Коэффициент трения в резьбе	
μ_K	Коэффициент трения опорной поверхности головки болта	–
μ_T	Коэффициент трения в линии разъема	
μ'_G	Кажущийся коэффициент трения в резьбе	
ρ_G	Угол трения при μ'_G	–
σ_a	Переменное напряжение в крепежной детали	Н/мм²
σ_A	Допустимое переменное напряжение	Н/мм²
$\sigma_{red,B}$	Сниженное напряжение в рабочем состоянии	Н/мм²
$\sigma_{red,M}$	Сниженное напряжение в установленном состоянии	Н/мм²
$\sigma_{z,M}$	Макс. напряжение растяжения в установленном состоянии	Н/мм²
σ_z	Макс. напряжение растяжения в рабочем состоянии	Н/мм²
τ_t	Макс. напряжение кручения в резьбе	Н/мм²
φ	Шаг	'
Φ	Соотношение сил	–
Φ_n	Соотношение сил при $n < 1$	–

Для обычных болтов или винтов используются метрические профили резьбы (DIN 13, ISO 965). Для труб, фитингов, резьбовых фланцев и т.д. применяются трубные резьбы в соответствии со стандартом DIN ISO 228-1 или DIN 2999.

Расчеты резьбовых крепежных деталей

Основой для расчета резьбовых крепежных деталей с высокой нагрузочной способностью является Директива VDI 2230. Ее можно использовать в качестве простого и достаточно точного метода расчета цилиндрической крепежной детали с однозаходной резьбой, которую можно рассматривать как секцию жесткой крепежной детали с многозаходной резьбой. Это означает, что во многих случаях даже сложные детали с многозаходной резьбой можно рассматривать как однозаходные. Условие для этого заключается в том, что оси детали крепления параллельны друг другу и перпендикулярны к плоскости разъема. Компоненты также должны быть упругими. Другой важный фактор состоит в том, что рассматриваются только центрально нагруженные и напряженные детали крепления. О случае высоких эксцентричных напряжений, которые могут вызвать раскрытие по линии разъема, см. в VDI 2230 (рис. 1).

Классы прочности резьбовых деталей крепления

В соответствии с DIN EN 20898, классы прочности болтов, винтов и шпилек идентифицируются двумя числами, разделенными точкой. Первое число представляет собой 1/100 минимального предела прочности на растяжение; второе число представляет собой 10-кратное отношение предела текучести к пределу прочности на растяжение. Перемножение двух чисел дает 1/10 минимального предела текучести (пример: 8.8 —> $R_e = R_{p0,2}$ = 640 МПа).

Класс прочности стандартной гайки идентифицируется одним числом. Это число соответствует 1/100 минимального предела прочности на разрыв болта того же класса. Чтобы оптимизировать использование материала, необходимо всегда применять болты и гайки одного класса прочности (например, болт класса 10.9 с гайкой класса 10).

Затяжка резьбовых деталей

Предварительное напряжение

Резьбовые соединения являются предварительно нагруженными соединениями, в которых крепежная деталь при затяжке растягивается на величину f_{SV}, а соединяемые детали сжимаются на величину f_{PV}. Величина деформации зависит от размеров (сечения и длины) и материалов (модуля упругости). В соответствии с законом Гука деформация в упругом диапазоне пропорциональна преобладающей линейной силе. Отношение силы F к изменению длины f выражается коэффициентом упругости или упругой жесткостью:

$$R = \frac{F}{f} = \frac{E \cdot A}{l}$$

Если значения упругой жесткости крепежных деталей и сжимаемых частей известны (они могут быть вычислены в соответствии с VDI 2230), предварительно нагруженную резьбовую деталь крепления можно представить диаграммой нагрузки-удлинения (см. рис. 2). После сборки устанавливается равновесие сил, поэтому предварительные нагрузки в болте и соединенных деталях идентичны.

Рабочие усилия

В случае поперечно напряженных резьбовых крепежных деталей (рабочее усилие F_Q направлено перпендикулярно к оси крепежной

Рис. 1. Нагрузки, прилагаемые к резьбовым крепежным деталям:
a – центрально напряженная и нагруженная крепежная деталь; b – эксцентрично напряженная и нагруженная крепежная деталь; c – соединение с несколькими крепежными деталями;
1 – область приложения давления



детали) силы передаются в плоскости разъема за счет трения. Если силы трения, создаваемые предварительной нагрузкой крепежной детали, больше передаваемых рабочих усилий, диаграмма нагрузки-удлинения не изменяется. Это означает, что крепежная деталь не «замечает» внешней нагрузки.

При коэффициенте трения в линии разъема μ_T, количестве крепежных деталей n_S, количестве пар поверхностей трения i и коэффициенте запаса против сдвига S_R минимальная требуемая сила сжатия вычисляется следующим образом:

$$F_{K,min} = F_V \geq \frac{S_R F_Q}{\mu_T n_S i}.$$

Если внешнее рабочее усилие F_A действует в направлении оси крепежной детали, как показано на рис. 1, болт удлинняется на f_A. В то же время сжатие соединенных деталей уменьшается на такую же величину. Таким образом, болт испытывает дополнительную нагрузку F_{SA}, в то время как напряжение в соединенных деталях уменьшается на F_{PA}. Дополнительная нагрузка на крепежную деталь F_{SA} зависит от упругой жесткости и текучести крепежной детали.

Чем «мягче» крепежная деталь (растягиваемый болт: длинный и тонкий), тем меньше дополнительная нагрузка в болте F_{SA} вызываемая внешним осевым рабочим усилием F_A. Это и должно быть целью, особенно в случае воздействия динамических рабочих усилий (например, на болты головки блока цилиндров).

Приложение силы

Упругая жесткость крепежной детали и напряженных частей также зависит от места приложения силы. Если осевое рабочее усилие F_A прилагается непосредственно к головке болта, коэффициент приложения силы n=1. Если усилие прилагается по линии разъема, n=0. На практике точка приложения силы находится между этими крайними положениями. В этом случае ослабляется нагрузка только части напряженных деталей. Это вызывает увеличение упругой жесткости R_P напряженных частей вследствие уменьшения полезной длины болта. Напряженные части затянутых деталей воздействуют на крепежную деталь, которая при этом становится явно длиннее и, следовательно, мягче (см. рис. 3). Таким образом, при малых значениях n имеют место небольшие дополнительные усилия, воздействующие на крепежную деталь. Это оказывает благоприятное влияние на коэффициент запаса крепежной детали. Однако, в то же время уменьшается усилие сжатия, что неблагоприятно для функционирования соединения.

Простого метода вычисления коэффициента приложения силы n, определяющего точку приложения силы, не существует. При этом либо производится оценка значения n $(0 \leq n \leq 1)$, либо выполняется приблизительный расчет в соответствии со стандартом VDI 2230. Силы, указанные на диаграмме нагрузки-удлинения могут быть вычислены в соответствии с табл. 2.

Силы и моменты, воздействующие на крепежную деталь

Модель вычислений

Простейшим способом представить соотношения сил, действующих в резьбовой крепежной детали, является концентрация поверхностного давления, распределенного по всем виткам резьбы, на одной гайке. Во время затяжки или ослабления гайка перемещается по резьбе болта, которая, если ее развернуть, представляет собой наклонную плоскость или клин.

Затяжка резьбовых крепежных деталей

Во время затяжки гайка проталкивается по клину вверх под действием окружного усилия F_U. Результирующая нормальная сила

Рис. 2. Затяжка резьбовых деталей:
a – диаграмма нагрузки-удлинения при сборке, b – диаграмма нагрузки-удлинения при осевом рабочем усилии F_A

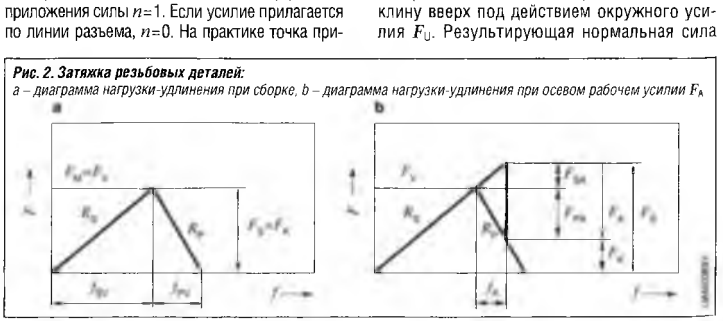


Таблица 2. Усилия в резьбовых крепежных деталях (в зависимости от места приложения силы)

Сила	Приложение силы к головке болта $n=1$	Приложение силы в любом месте $0<n<1$	Приложение силы по линии разъема $n=0$
Макс. усилие в крепежной детали	$F_S = F_V + \Phi \cdot F_A$	$F_S = F_V + \Phi_n \cdot F_A$	$F_S = F_V$
Усилие сжатия	$F_K = F_V - (1-\Phi) \cdot F_A$	$F_K = F_V - (1-\Phi_n) \cdot F_A$	$F_K = F_V - F_A$
Дополнительная сила, действующая на крепежную деталь	$F_{SA} = \Phi \cdot F_A$	$F_{SA} = \Phi_n \cdot F_A$	$F_{SA} = 0$
Дополнительная сила, действующая на соединенные детали	$F_{PA} = (1-\Phi) \cdot F_A$	$F_{PA} = (1-\Phi_n) \cdot F_A$	$F_{PA} = F_A$

Где $\Phi = R_S/(R_P + R_S)$ и $\Phi_n = n\ \Phi$

F_N вызывает силу трения F_R, которая действует в противоположном направлении с учетом угла трения ρ. Однако, поскольку все стандартизованные профили резьб имеют наклонные рабочие стороны, в плоский многоугольник сил входит только составляющая $F'_N = F_N \cdot \cos\alpha/2$. Сила трения определяется следующим образом:

$$F_R = F_N \cdot \mu_G = F'_N \cdot \mu'_G.$$

Для расчета многоугольника сил в плоскости, параллельной оси крепежной детали, вводится кажущийся коэффициент трения:

$$\mu'_G = \frac{\mu_G}{\cos\alpha/2} = \tan\rho'.$$

Если на диаметр рабочей стороны профиля d_2 действует окружное усилие, момент становится равным

$$M_G = F_V \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho').$$

Чтобы затянуть болт до предварительного натяга F_V, необходимо, чтобы момент трения головки M_{KR} преодолел силу трения между опорными поверхностями болта и гайки в дополнение к моменту затяжки M_G. При коэффициенте трения μ_K и среднем фрикционном диаметре головки болта D_{Km} момент трения головки вычисляется следующим образом:

$$M_{KH} = F_V \cdot \mu_K \cdot \frac{D_{Km}}{2}.$$

Момент затяжки болта, прилагаемый во время сборки, равен:

$$M_A = M_G + M_{KR} = F_V \left(\frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho') + \mu_K \frac{D_{Km}}{2} \right).$$

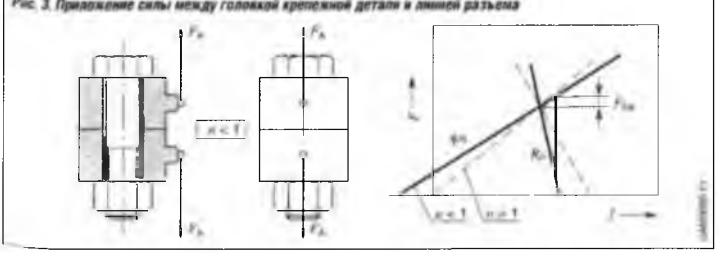
Развинчивание резьбовых соединений

При развинчивании резьбового соединения сила трения действует в противоположном направлении по сравнению с затяжкой. Момент выворачивания болта вычисляется следующим образом:

$$M_L = F_V \left(\frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho') - \mu_K \frac{D_{Km}}{2} \right).$$

В случае самоконтрящихся резьб ($\varphi < \rho'$) момент выворачивания становится отрицательным. Это означает, что момент должен быть приложен в направлении, противоположном направлению затяжки.

Рис. 3. Приложение силы между головкой крепежной детали и линией разъема



Конструкция резьбовых деталей

Перенапряжение

Если минимальная длина резьбовой части m = (от 1.0 до 1.5)$\cdot d$, резьбовая крепежная деталь выходит из строя в случае перенапряжения не потому, что срезаются витки резьбы, а вследствие разрыва болта с цилиндрической резьбой.

Напряжение при сборке

Когда резьбовая крепежная деталь затянута до предварительного натяга F_V, в ней имеет место напряжение растяжения. Под действием момента затяжки M_G также возникает напряжение кручения. Поскольку трение в резьбе предотвращает отворачивание болта, напряжение кручения действует также и после затяжки. В соответствии с теорией энергии изменения формы сниженное напряжение в болте составляет:

$$\sigma_{red,\,M} = W\sigma_{z,M} + 3\,\tau_t^2 \le \upsilon \cdot R_{p0.2},$$

при напряжении растяжения:

$$\sigma_{z,M} = \frac{F_{V,max}}{A_S} = \frac{\alpha_A \cdot F_V}{A_S}$$

и напряжении кручения:

$$\tau_t = \frac{M_{G,max}}{W_t} = \frac{16 \cdot \alpha_A \cdot F_V \cdot d_2 \cdot \tan(\varphi + \rho')}{2 \cdot \pi \cdot d_3^3}$$

Коэффициент затяжки α_A учитывает неизбежные во время сборки неточности. Для затяжки с контролем момента (при помощи динамометрического ключа) он составляет α_A = 1,4 – 1,6; для импульсной затяжки (при помощи гаечного ключа ударного действия), он составляет α_A = 2,5 – 4,0.

В целях обеспечения высокого уровня функциональной безопасности, необходимо стремиться к максимально возможному использованию свойств материала. Это учитывается посредством к.п.д. υ. В таблице 3 приведены значения допустимых предварительных нагрузок и моментов затяжки для различных коэффициентов трения при υ = 90% (0,9) стандартизованного минимального предела текучести.

Рис. 4. Силы, требуемые для затяжки резьбового соединения
1 – резьба болта,
2 – гайка

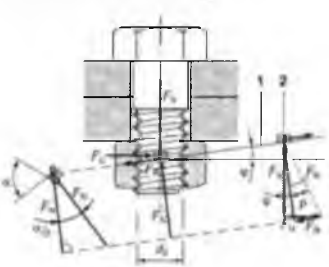
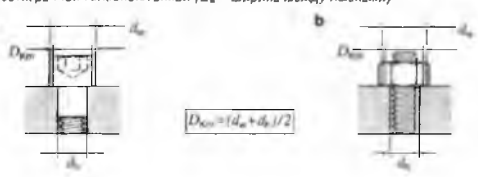


Рис. 5. Эффективный диаметр D_{km} для определения момента трения головки
a – для болта с внутренним шестигранником (d_w - диаметр головки),
b – для болта с шестигранной головкой/гайкой (d_w = ширина между лысками)



Статическое напряжение

Осевое рабочее усилие F_A увеличивает напряжение растяжения в болте. Поскольку в рабочем состоянии эффект напряжения кручения менее ощутим, чем в установленном состоянии, директива VDI 2230 применима к пониженному напряжению:

$$\sigma_{red,B} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3(0{,}5 \cdot \tau_t)^2} < R_{p0,2}$$

при напряжении растяжения:

$$\sigma_z = \frac{F_{S,max}}{A_S} = \frac{\alpha_A \cdot F_V + F_{SA}}{A_S}$$

Вибрационные напряжения

При наличии динамических рабочих сил F_A переменная составляющая напряжения σ_a не должна превышать допустимого переменного напряжения σ_A. При этом применимо следующее выражение:

$$\sigma_a = \frac{F_{S,max} - F_{S,min}}{2 \cdot A_S} \le \sigma_A$$

Допустимое переменное напряжение σ_A не зависит от класса прочности. Оно зависит только от номинального диаметра (см. табл. 4).

Поверхностное давление между опорными поверхностями головки болта и гайки

В случае больших предварительных натягов необходимо контролировать поверхностное давление, действующее на опорные поверх-

Таблица 3. Допустимые предварительные натяги и моменты затяжки стандартных болтов (по стандарту DIN 2230)

Резьба	Предварительный натяг F_V для различных коэффициентов трения μ в резьбе						Момент затяжки M_A при коэффициенте трения $\mu = 0{,}12$					
	F_V в $10^3 \cdot$ Н при $\mu = 0{,}1$			F_V в 10^3 Н при $\mu = 0{,}2$			M_A в Н м где μ_K = 0,1			M_A в Н м где μ_K = 0,2		
	8.8	10.9	12.9	8.8	10.9	12.9	8.8	10.9	12 9	8.8	10.9	12.9
M4	4,5	6,7	7,8	3,9	5,7	6,7	2,6	3,9	4,5	4,1	6,0	7,0
M5	7,4	10,8	12,7	6,4	9,4	11,0	5,2	7,6	8,9	8,1	11,9	14,0
M6	10,4	15,3	17,9	9,0	13,2	15,5	9,0	13,2	15,4	14,1	20,7	24,2
M8	19,1	28,0	32,8	16,5	24,3	28,4	21,6	31,8	37,2	34,3	50,3	58,9
M10	30,3	44,5	52,1	26,3	38,6	45,2	43	63	73	68	100	116
M12	44,1	64,8	75,9	38,3	56,3	65,8	73	108	126	117	172	201
M14	60,6	88,9	104,1	52,6	77,2	90,4	117	172	201	187	274	321
M16	82,9	121,7	142,4	72,2	106,1	124,1	180	264	309	291	428	501
M18	104	149	174	91,0	129	151	259	369	432	415	592	692
M20	134	190	223	116	166	194	363	517	605	588	838	980
M22	166	237	277	145	207	242	495	704	824	808	1151	1347
M24	192	274	320	168	239	279	625	890	1041	1011	1440	1685
M27	252	359	420	220	314	367	915	1304	1526	1498	2134	2497
M30	307	437	511	268	382	447	1246	1775	2077	2931	2893	3386

ности головки болта и гайки. Чрезмерно высокое поверхностное давление может вызвать деформацию и потерю предварительного натяга. Это может привести к ослаблению резьбовых соединений.

Поверхностное давление p при максимальном воздействующем на крепежную деталь усилии не должно превышать допустимого предельного значения p_G (ориентировочные значения p_G см. в табл. 5):

$$p = \frac{4 \cdot F_{S,max}}{\pi \cdot (d_a^2 - d_h^2)} \leq p_G$$

Контрящие устройства резьбовых крепежных деталей

Причиной самопроизвольного ослабления резьбовых соединений является полная или частичная потеря предварительного натяга, которая, в свою очередь, вызывается эффектами осаждения (ослабления) или относительными перемещениями по линии разъема (выворачивание).

Ослабление

Контактное напряжение f_z, вызванное пластичной деформацией, приводит к потере предварительного натяга

$$F_z = \frac{R_P \cdot R_S}{R_P + R_S} \cdot f_z$$

Контактное напряжение f_z в мкм зависит от свойств поверхности и количества линий разъема (см. табл. 6).

Общее контактное напряжение равно сумме напряжений отдельных компонентов. Однако, значение контактного напряжения, определенное таким образом, действительно только в том случае, если не превышено предельно допустимое поверхностное давление. В противном случае будет иметь место значительно более высокое осаждение. Контрящие устройства предназначены для снижения или компенсации осаждения.

Надежная защита от ослабления соединений может быть обеспечена посредством следующих мер:

- большой предварительный натяг;
- Применение упругих резьбовых крепежных деталей;
- обеспечение низких поверхностных давлений за счет большой площади опорных поверхностей и достаточной длины резьбовой части;
- небольшое количество линий разъема;
- отсутствие пластмассовых или квазиупругих элементов (например, уплотнений).

Таблица 4. Допустимое переменное напряжение σ_A

Диапазон диаметров	M6–M8	M10–M18	M20–M30
Допустимое переменное напряжение σ_A в Н/мм²	60	50	40

Таблица 5. Стандартные значения предельного поверхностного давления p_G в соответствии с VDI 2230

Материал	Предельное поверхностное давление p_G в Н/мм²
GD-AlSi 9 Cu 3	290
S 235 J	490
E 295	710
EN-GJL-250	850
34 CrNiMo 6	1080

Таблица 6. Контактное напряжение f_z, зависящее от свойств поверхности и количества линий разъема

Шероховатость поверхности в мкм	Нагрузка	Контактное напряжение f_z в мкм		
		в резьбе	на опорной поверхности болта или гайки	на линии разъема
$R_z < 10$	Растяжение/сжатие Сдвиг	3,0 3,0	2,5 3,0	1,5 2,0
$10 \leq R_z < 40$	Растяжение/сжатие Сдвиг	3,0 3,0	3,0 4,5	2,0 2,5
$40 < R_z < 160$	Растяжение/сжатие Сдвиг	3,0 3,0	4,0 6,5	3,0 3,5

Выворачивание

Динамические напряжения, в особенности действующие перпендикулярно к оси крепежной детали, могут вызывать ослабление затяжки резьбовых крепежных деталей, несмотря на достаточный предварительный натяг. Если могут иметь место поперечные перемещения, предотвратить выворачивание и сохранить функцию соединения могут помочь контрящие устройства. Надлежащие меры включают:

- предотвращение поперечных перемещений посредством надежного стопорения по линии разъема;
- применение упругих резьбовых крепежных деталей;
- большая полезная длина болта;
- большой предварительный натяг;
- применение подходящих контрящих устройств (стопорные или самоконтрящиеся элементы).

Список литературы

[1] DIN-Taschenbuch 10: Mechanische Verbindungselemente – Schrauben (Mechanical threaded fasteners – Screws and bolts), Beuth-Verlag 2001.

[2] DIN-Taschenbuch 45: Gewindenormen (Thread standards), Beuth-Verlag 2000.

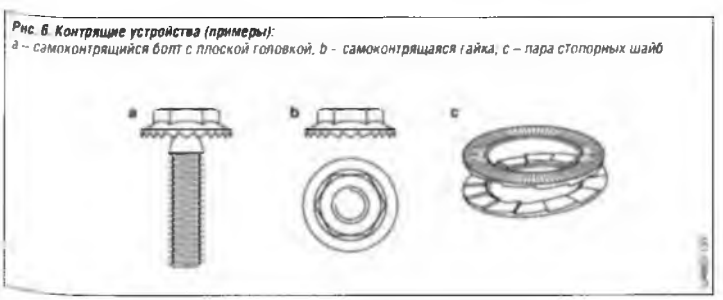
[3] DIN-Taschenbuch 140: Mechanische Verbindungselemente – Muttern, Zubeh rteile f r Schraubenverbindungen (Mechanical threaded fasteners – Nuts, accessories for threaded fasteners), Beuth-Verlag 2001.

[4] Haberhauer/Bodenstein: Maschinenelemente, 15th Edition, Springer-Verlag 2008.

[5] VDIDirective2230:SystematischeBerechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, VDI-Verlag 2003.

[6] Wiegand/Kloos/Thomala: Schraubenverbindungen, Springer-Verlag 1988.

Рис. 6. Контрящие устройства (примеры):
a – самоконтрящийся болт с плоской головкой, b – самоконтрящаяся гайка, c – пара стопорных шайб



Выбор резьбы

Рис. 7. Метрические резьбы по стандарту IS
(DIN 13, ISO 965); номинальные размеры

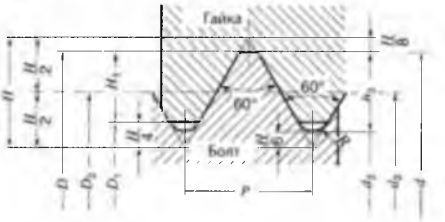


Таблица 7. Метрическая стандартная резьба
Пример обозначения. М8 (номинальный диаметр резьбы 8 мм)

Номинальный диаметр резьбы	Шаг	Делительный диаметр	Малый диаметр		Глубина резьбы		Область напряжения
$d = D$	P	$d_2 = D_2$	d_3	D_1	h_3	H_1	A_s в мм²
3	0,5	2,675	2,387	2,459	0,307	0,271	5,03
4	0,7	3,545	3,141	3,242	0,429	0,379	8,78
5	0,8	4,480	4,019	4,134	0,491	0,433	14,2
6	1	5,350	4,773	4,917	0,613	0,541	20,1
8	1,25	7,188	6,466	6,647	0,767	0,677	36,6
10	1,5	9,026	8,160	8,376	0,920	0,812	58,0
12	1,75	10,863	9,853	10,106	1,074	0,947	84,3
14	2	12,701	11,546	11,835	1,227	1,083	115
16	2	14,701	13,546	13,835	1,227	1,083	157
20	2,5	18,376	16,933	17,294	1,534	1,353	245
24	3	22,051	20,319	20,752	1,840	1,624	353

Таблица 8. Метрическая мелкая резьба
Пример обозначения: М8 x 1 (номинальный диаметр резьбы 8 мм и шаг резьбы 1 мм)

Номинальный диаметр резьбы	Шаг	Шаг диаметр	Малый диаметр		Глубина резьбы		Область напряжения
$d = D$	P	d_2 D_2	d_3	D_1	h_3	H_1	A_s в мм²
8	1	7,350	6,773	6,917	0,613	0,541	39,2
10	1,25	9,188	8,466	8,647	0,767	0,677	61,2
10	1	9,350	8,773	8,917	0,613	0,541	64,5
12	1,5	11,026	10,160	10,376	0,920	0,812	88,1
12	1,25	11,188	10,466	10,647	0,767	0,677	92,1
16	1,5	15,026	14,160	14,376	0,920	0,812	167
18	1,5	17,026	16,160	16,376	0,920	0,812	216
20	2	18,701	17,546	17,835	1,227	1,083	258
20	1,5	19,026	18,160	18,376	0,920	0,812	272
22	1,5	21,026	20,160	20,376	0,920	0,812	333
24	2	22,701	21,546	21,835	1,227	1,083	384
24	1,5	23,026	22,160	22,376	0,920	0,812	401

Рис. 8. Трубные резьбы для несамоуплотняющихся соединений
(DIN ISO 228, часть 1); цилиндрические наружные и внутренние резьбы; номинальные размеры

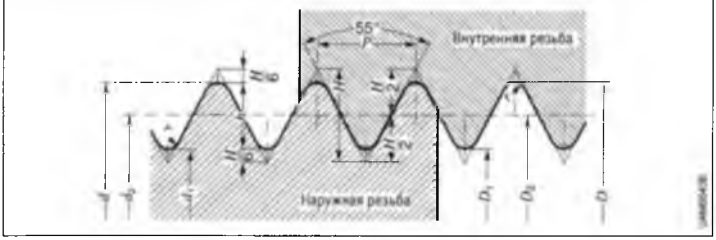


Таблица 9. Пример обозначения: G 1/2 (номинальный размер резьбы 1/2 дюйма)

Номинальный размер резьбы	Количество ниток на один дюйм	Шаг P, мм	Глубина резьбы h, мм	Наружный диаметр $d = D$, мм	Диаметр делительной окружности $d_2 = D_2$, мм	Внутренний диаметр резьбы $d_1 = D_1$, мм
1/4	19	1,337	0,856	13,157	12,301	11,445
3/8	19	1,337	0,856	16,662	15,806	14,950
1/2	14	1,814	1,162	20,955	19,793	18,631
3/4	14	1,814	1,162	26,441	25,279	24,117
1	11	2,309	1,479	33,249	31,770	30,291

Рис. 9. Дюймовые трубные резьбы для труб и фитингов
(DIN 2999); цилиндрические внутренние резьбы и конические внутренние резьбы; номинальные размеры (в мм)



Таблица 10. Дюймовые трубные резьбы отворота для труб и фитингов

Обозначение		Наружный диаметр	Диаметр делительной окружности	Внутренний диаметр резьбы	Шаг	Количество ниток на один дюйм
Наружная резьба	Внутренняя резьба	$d = D$	$d_2 = D_2$	$d_1 = D_1$	P	Z
R 1/4	Rp 1/4	13,157	12,301	11,445	1,337	19
R 3/8	Rp 3/8	16,662	15,806	14,950	1,337	19
R 1/2	Rp 1/2	20,955	19,793	18,631	1,814	14
R 3/4	Rp 3/4	26,441	25,279	24,117	1,814	14
R 1	Rp 1	33,249	31,770	30,291	2,309	11

Область применения: для соединений труб, снабженных цилиндрической внутренней резьбой, с вентилями, фитингами, резьбовыми фланцами и т.п., имеющими конические наружные резьбы

Защелкивающиеся соединения пластмассовых деталей

Характеристики

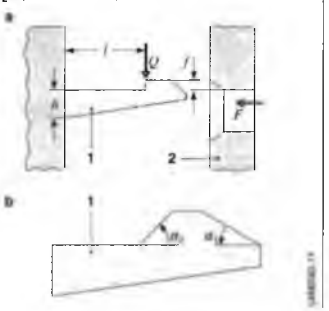
Защелкивающиеся соединения являются дешевым и эффективным способом установки пластиковых компонентов. Они используются для соединения частей кожухов, для фиксации соединений и для крепления монтажных деталей на пластиковых кожухах. В них используются такие свойства пластмасс, как высокая способность к растяжению и относительно низкая жесткость.

Все защелкивающиеся соединения характеризуются кратковременным отклонением упругого элемента от первоначального положения в процессе соединения, после чего он возвращается на место за установочным выступом ответной части. В зависимости от конфигурации углов элементов соединения, можно создавать как разъемные без разрушения, так и неразъемные соединения (см. рис. 1).

Основные формы защелкивающихся соединений показаны в табл. 1:

- упругие защелкивающиеся крючки (изгибающиеся пружины закреплены на одной стороне);
- упругие фиксаторы;
- кольцевые соединения, в том числе сегментированные (с продольными прорезями);
- сферические защелкивающиеся соединения, в том числе сегментированные;
- поворотные защелкивающиеся крючки.

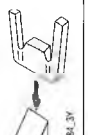
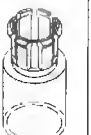
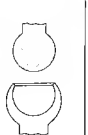
Рис. 1. Защелкивающееся соединение (принцип действия):
a – определяющие переменные;
b – углы соединения и освобождения (разъемное соединение: $\alpha_2 > 90°$, неразъемное соединение: $\alpha_2 > 90°$);
1 – пружинный элемент; 2 – фиксирующий элемент; f – ход пружинного элемента (задней секции); l – длина; h – толщина в области корня пружинного элемента; F – соединяющая сила; Q – отклоняющая сила; α_1 – угол соединения; α_2 – угол освобождения



Указания по проектированию и компоновка

Пружинные элементы разрабатываются с учетом допустимого удлинения пластмассы в процессе соединения. При этом следует брать в расчет наименее подходящий материал (например, сухой полиамид). В качестве

Таблица 1. Основные типы и формы защелкивающихся соединений

Форма	Крючкообразная форма			Кольцевая форма		
				Кольцо/кольцевая канавка	Сегментированное кольцо/кольцевая канавка	Секция полой сферы
Пружинный элемент	Пружина, работающая на изгиб	Торсионная пружина (+ пружина, работающая на изгиб)	Пружинная защелка	Кольцевая пружина	Сегментированная кольцевая пружина	Кольцевая пружина
Наименование	(Изгибающийся) крючок	Поворотный крючок	Упругий фиксатор	Кольцевой защелкивающийся элемент	Кольцевое защелкивающееся соединение	Сферический защелкивающийся элемент
Тип	 UAM0084_1Y	 UAM0084_2Y	 UAM0084_3Y	 UAM0084_4	 UAM0_84_5Y	 UAM0084_6Y

модуля упругости используется секущий модуль:

$$E_s = \sigma_1/\varepsilon_1,$$

зависящий от удлинения (см. рис. 2). Значения модуля для различных пластмасс можно получить, например, из базы данных CAMPUS (http://www.campusplastics.com).

Чтобы достичь равномерного распределения напряжения и оптимального использования материала в диапазоне изгиба упругих элементов, необходимо, чтобы толщина от основания до свободного конца элемента уменьшилась наполовину. В качестве альтернативы можно на одну четверть уменьшить ширину элемента в области свободного конца. Избежать возникновения концентраций напряжений могут помочь скругления в области соединения упругого элемента с компонентом.

Во избежание ползучести под нагрузкой и, следовательно, остаточной деформации, после соединения упругий элемент должен полностью вернуться в исходное состояние. Наличие напряжения растяжения в упругом элементе под действием рабочих усилий допускается.

Допустимое отклонение (ход пружиного элемента f) в процессе соединения зависит от геометрии крючка и допустимого удлинения ε пластмассы (см. табл. 2). Формулы для различных поперечных сечений могут быть взяты из соответствующей технической литературы, или они включены в специальные программы вычислений.

Отклоняющая сила Q вычисляется, исходя из жесткости пластмассы в виде секущего модуля E_s и геометрии соединения (изгибающего момента / модуля сечения W).

Соединяющая сила F вычисляется, исходя из отклоняющей силы Q, угла соединения α_1 (обычно 30°) и коэффициента трения μ между соединяемыми компонентами по формуле:

$$F = \frac{Q\,(\mu + \tan\alpha_1)}{(1 - \mu\tan\alpha_1)}.$$

Сила освобождения защелкивающегося соединения вычисляется по той же формуле, но в этом случае следует использовать значение угла освобождения крючка α_2 (обычно 60°). В случае неразъемного соединения ($\alpha_2 \geq 90°$) прочность ограничивается максимально допустимой осевой нагрузкой защелкивающихся крючков.

Программы вычислений

Различные производители пластмасс в качестве дополнительной услуги предлагают своим покупателям легкие в использовании программы вычислений (например, "Snaps" от BASF, "FEAsnap" от Bayer и "Fitcalc" от Ticona). В эти программы включено большинство характеристик материалов для номенклатуры изделий изготовителей.

Рис. 2. Определение секущего модуля E_s
$E_{s1} = \sigma_1/\varepsilon_1$
E_0 – модуль упругости

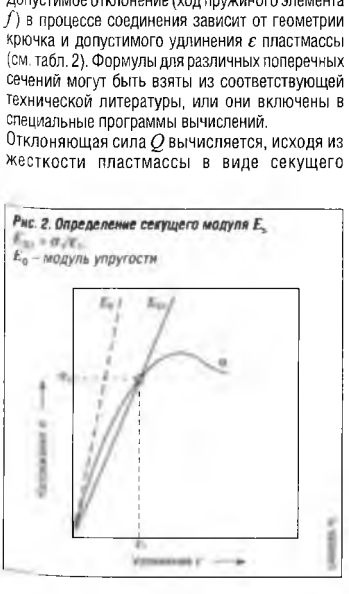


Таблица 2. Справочные значения допустимого удлинения ε для защелкивающихся соединений
(Кратковременное для однократного соединения, для многократных соединений значение составляет приблизительно 60 %).

Материалы	ε
Термопластичные пластмассы, полукристаллические, ненаполненные	
Полиэтилен	0,080
Полипропилен	0,060
Полиамид, кондиционированный,полиоксиметилен (POM)	0,060
Полиамид, сухой	0,040
Полибутилен (PBT)	0,050
Термопластичные пластмассы, аморфные,ненаполненные	
Поликарбонат	0,030
Акрилнитрил-бутадиен-стирен/стиренбутадиен (ABS/SB)	0,025
Ацетилцеллюлозный этрол (CAB)	0,025
Поливинилхлорид	0,020
Полистирол	0,018
Термопластичные пластмассы, наполненные стекловолокном	
30 % стекловолокна-полиамид, кондиционированный	0,020
30 % стекловолокна-полиамид, сухой	0,015
30 % стекловолокна-поликарбонат	0,018
30 % стекловолокна-PBT	0,015
30 % стекловолокна-ABS	0,012

Неразъемные соединения

Сварка

Автомобильные узлы и детали могут соединяться многочисленными способами и, в том числе, различными видами сварки ([1], [2]). Наиболее распространенные способы сварки – контактная сварка и сварка плавлением. На рис. 1 показаны наиболее важные процессы контактной сварки, используемые в производстве (виды процессов и обозначения см. в DIN 1910, Часть 100, [3]).

Электроконтактная сварка

Точечная сварка

При выполнении точечной сварки (рис. 2, a и 2, b) электрический ток подается на определенные места соединяемых частей, что обеспечивает местный нагрев и переводит материал в пластическое или расплавленное состояние; затем, при приложении давления, эти части соединяются между собой. Электроды точечной сварки, проводящие электрический ток, также обеспечивают приложение силы сжатия соединяемых деталей. Количество тепла, требуемое для создания точки сварки, определяется в соответствии с уравнением:

$Q = I^2 R\, t$ (закон Джоуля).

Точное требуемое количество тепла является функцией интенсивности тока, электрического сопротивления и времени. Для получения хорошего сварочного соединения и требуемого диаметра сварных точек следует согласовать следующие параметры:

- сварочный электрический ток I;
- усилие, прикладываемое к электроду F;
- время сварки t.

По способу подвода электрического тока различают:

- двустороннюю контактную точечную сварку (рис. 2, a);
- одностороннюю контактную точечную сварку (рис. 2, b).

Электрод для выполнения точечной электроконтактной сварки выбирается с учетом его формы, наружного диаметра и диаметра сварочной точки. Поскольку соединяемые детали должны быть, насколько возможно, очищены от окалины, оксидов, краски, смазки и масла, при необходимости они перед сваркой подвергаются соответствующей поверхностной обработке.

Области применения:

- соединение листовых деталей толщиной до 3 мм – внахлестку или в виде приварного фланца;
- соединение двух или более листовых деталей различной толщины и изготовленных из различных материалов;
- точечная сварка в сочетании со склеиванием.

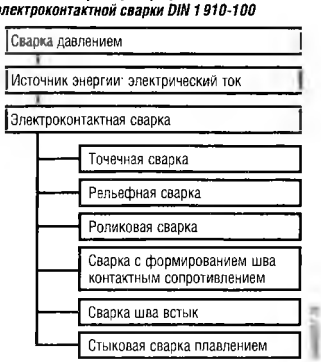
Контактная рельефная сварка

Процесс (рис. 2, c), при котором электроды, имеющие большую поверхностную площадь, служат для подвода сварочного тока и приложения давления к соединяемым деталям. Выступы, имеющиеся на этих деталях, позволяют концентрировать электрический ток в местах сварки. Усилия, действующие в процессе сварки на соединяемые поверхности через электрод, заставляют эти выступы частично или полностью сдавливаться. В результате обеспечивается постоянное и неразъемное соединение в контактной зоне вдоль сварного шва. В зависимости от вида выступов (скругленной, вытянутой или кольцевой формы) и силы тока можно производить сварку одного или одновременно нескольких выступов.

Этот вид сварки, таким образом, делится на:

- сварку одного выступа;
- сварку нескольких выступов.

Рис. 1. Классификация процессов электроконтактной сварки DIN 1910-100



Контактная рельефная сварка требует очень высоких сварочных токов в короткие отрезки времени.

Применяются:
- соединение деталей различной толщины;
- объединение нескольких сварочных операций в один процесс.

Роликовая (шовная) сварка

В этом процессе (рис. 2, d) электроды, применяемые для точечной сварки, заменяются роликами. Контакт между роликовой парой и свариваемой деталью ограничивается очень небольшой поверхностью. Роликовый электрод обеспечивает подвод к свариваемым деталям электрического тока и оказывает давление на зону сварки; вращение ролика координируется с перемещением свариваемых деталей.

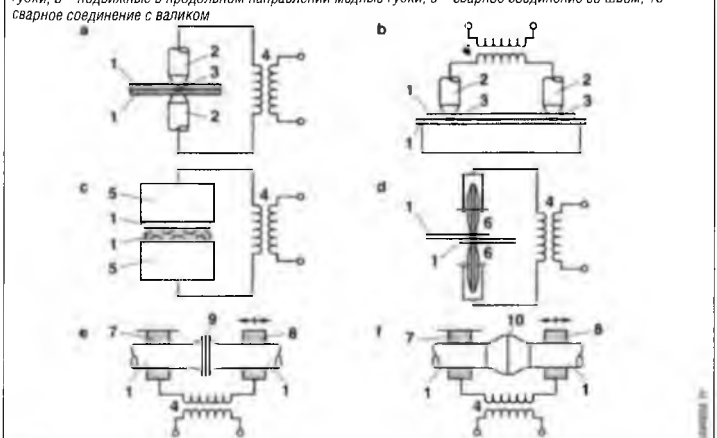
Применяются:
- получение плотных сварных швов или швов в виде сварных точек (например, при сварке топливных баков).

Стыковая сварка плавлением

При стыковой сварке плавлением (рис. 2, e) торцевые поверхности свариваемых деталей прижимаются друг к другу с незначительной силой, а электрический ток, проходящий через них, обеспечивает местный нагрев и плавление этих поверхностей (высокая плотность тока) (подача тока через медные зажимы). Прикладываемое через электрод усилие вытесняет расплавленный металл из зоны сварки и позволяет формировать стыковой шов.

При этом торцевые поверхности свариваемых деталей должны быть параллельны друг другу и перпендикулярны к направлению действия усилия (по возможности). Поверхности не обязательно должны быть гладкими. Следует предусмотреть припуск по длине деталей для компенсации потерь металла при сварке.

Рис. 2. Процессы электроконтактной сварки:
a – двусторонняя точечная сварка; b – односторонняя точечная сварка;
c – рельефная сварка; d – роликовая сварка; e – стыковая сварка оплавлением;
f – шовно-стыковая сварка;
1 – соединяемые детали; 2 – электроды; 3 – точка сварки; 4 – трансформатор;
5 – электроды с большой площадью поверхности; 6 – роликовые электроды; 7 – неподвижные медные губки; 8 – подвижные в продольном направлении медные губки; 9 – сварное соединение со швом; 10 – сварное соединение с валиком



В результате:
– шов по своим характеристикам аналогичен шву при роликовой сварке.

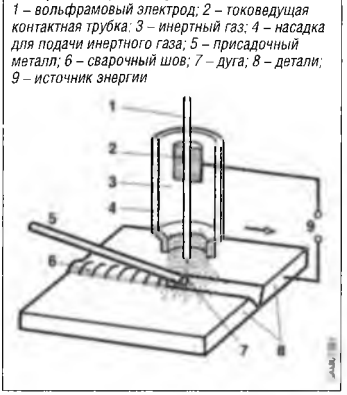
Области применения:
– стыковые соединения, например, ободов, звеньевых цепей;
– процессы, применяемые в мастерских, например, сварка полотен ленточных пил.

Шовная сварка встык
Для подачи сварочного тока к соединяемым деталям применяются медные зажимы (рис. 2, f). При достижении сварочной температуры подача электрического тока к деталям прерывается. Сварка деталей осуществляется при поддержании постоянного давления (требуется соответствующая предварительная механическая обработка контактных поверхностей). В результате получается сварной шов без заусенцев. В этом процессе из зоны стыка не могут быть полностью удалены загрязняющие частицы.

Результат:
– сварной шов с характерным выступающим валиком.

Области применения:
– стыковые соединения, например, валов, осей.

Рис. 3. Принцип сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа:
1 – вольфрамовый электрод; 2 – токоведущая контактная трубка; 3 – инертный газ; 4 – насадка для подачи инертного газа; 5 – присадочный металл; 6 – сварочный шов; 7 – дуга; 8 – детали; 9 – источник энергии



Сварка плавлением
Термин «сварка плавлением» относится к процессу соединения деталей без приложения давления, только нагревом и расплавлением металла в ограниченной зоне. Один из видов сварки плавлением — электродуговая сварка в среде защитного (инертного) газа. Электрическая дуга образуется между электродом и свариваемыми деталями и служит источником теплоты. Слой инертного газа защищает зону расплава от воздействия атмосферы. В зависимости от типа применяемого электрода различают два вида сварки плавлением.

Сварка в среде защитного газа вольфрамовым электродом
В этом процессе электрическая дуга поддерживается между свариваемыми деталями и жестким неплавящимся вольфрамовым электродом. В качестве защитного газа применяются аргон или гелий. Присадочный металл в виде прутка подается сбоку (рис. 3).

Сварка в среде защитного газа плавящимся прутковым электродом
В этом процессе электрическая дуга образуется между плавящимся концом пруткового электрода (подаваемого в зону сварки) и свариваемыми деталями. Ток подается к прутковому электроду через токо-контактные наконечники в держателе сварочного электрода.В качестве защитных газов используются аргон, гелий или их соединения. Дуговая сварка металлическим электродом в среде инертного газа (MIG) используется для сварки материалов, особенно чувствительных к окислению, например, алюминиевых, магниевых, титановых и никелевых сплавов.

С другой стороны, при дуговой сварке металлическим электродом в среде активного газа (MAG) используется активный газ (например, CO_2 или смесь газов, содержащая CO_2, аргон и иногда кислород). MAG-сварка, среди прочего, применяется для сварки нелегированных и низколегированных сталей. Использование инертных газов с небольшими добавками активных газов для сварки высоколегированных сталей, например, нержавеющей стали, также относится к MAG-сварке.

Сварка лазерным лучом (лазерная сварка)
Лазерная сварка связана с использованием оптического квантового генератора в качестве источника энергии для расплавления металла в зоне сварки изделий. Монохроматическое лазерное излучение генерируется лазерным источником. Длина волны излучения определяется соответствующим способом возбуждения. В промышленной практике применяются ([4], [5]):
- углекислые лазеры;
- твердотельные лазеры (Nd:YAG);
- новые разработки – полупроводниковые лазеры;
- волоконные лазеры.

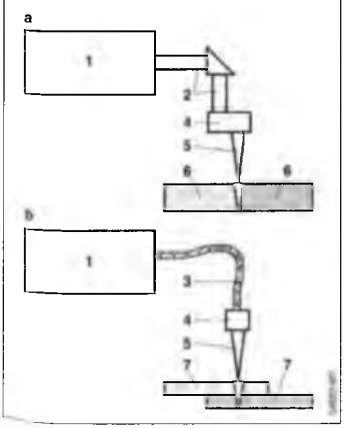
В зависимости от длины волны, для направления луча от генератора к месту сварки требуются направляющие трубки с рефракционными зеркалами (для углекислых лазеров) или волоконно-оптическими световодами (например, для твердотельных лазеров). Чтобы использовать энергию лазерного луча для сварки, необходимо сфокусировать его при помощи системы зеркал или линз. Это позволяет получить очень высокую плотность энергии в области сварочного шва, дающую эффект глубокого проплавления и в то же время позволяет получать узкие сварочные швы. В простейшем случае сварка производится без присадочного металла.

Для направления луча вдоль шва используется подача изделия относительно фокусирующей оптики, перемещение оптики относительно изделия или комбинация обоих способов. Для перемещения фокусирующих оптических устройств особенно хорошо подходят системы с волоконно-оптическими световодами, например, для роботизированной сварки конструкций с трехмерной геометрией швов.

В случае удаленной сварки луч направляется на изделие с относительно большого расстояния (фокусирующая оптика имеет большое фокусное расстояние) посредством перемещения фокусирующего зеркала или линзы внутри фокусирующего оптического устройства.

Используя переключатели луча, можно организовать работу нескольких рабочих станций от одного лазерного генератора.

Рис. 4. Принцип лазерной сварки:
a – направление луча зеркалом;
b – направление луча волоконно-оптическим световодом,
1 – лазерный генератор; 2 – направление луча рефракционным зеркалом, 3 – направление луча волоконно-оптическим световодом;
4 – фокусирующая оптика, 5 – сфокусированный лазерный луч, 6 – изделия (соединение встык) со сварочным швом; 7 – изделия (соединение внахлест) со сварочным швом



Области применения:
- соединение внахлест стальных листов при изготовлении кузовов;
- стыковая сварка нелегированных и низколегированных сталей в шасси и других узлах;
- сварка компонентов систем выпуска отработавших газов из высоколегированных сталей;
- соединение деталей автомобильных сидений;
- сварка алюминиевых сплавов (с присадочным металлом).

Другие сварочные процессы
В автомобильной промышленности также используются следующие сварочные процессы ([4], [5]):
- электроннолучевая сварка;
- сварка трением;
- электродуговая сварка под давлением (приварка шпилек);
- сварка накопленной энергией (импульсная контактная сварка).

Пайка

В процессе пайки дополнительный материал (припой) расплавляется и наносится для получения неразъемного соединения на две или несколько деталей, изготовленных из одного или разных металлов. Также используется флюс или защитный газ ([6], [7], [8]).

Флюсы (неметаллические материалы) используются для удаления и предотвращения образования любых оксидных пленок, остающихся на поверхностях соединяемых деталей после очистки. Имеется возможность защищать соединяемые поверхности покрытием из припоя. Сведения о флюсах можно найти в стандартах DIN EN 29454 и DIN EN 1045.

Точка плавления припоя лежит ниже температуры плавления соединяемых деталей. Припой равномерно распределяется вдоль места соединения без расплавления самих этих деталей.

Прочность паянного соединения может быть равна прочности самого базового материала. Для достижения требуемой прочности необходимо иметь узкие зазоры, в которых примыкающий, более прочный материал предотвращает деформацию припоя.

Для описания паянных соединений используются данные о температурном диапазоне, источнике тепла и геометрической форме соединения (структуре).

В отношении рабочей температуры различаются:
- пайка мягким припоем;
- пайка твердым припоем.

Рабочая температура определяется как наименьшая, при которой происходит расплавление и распределение припоя для образования соединения.

Еще один критерий, по которому классифицируются процессы пайки — это способ нагрева. Наиболее важными методами являются:
- ликвация;
- индукционная пайка;
- пайка открытым пламенем;
- пайка паяльником.

В отношении формы соединений различаются:
- пайка беззазорных соединений;
- пайка твердым припоем V-образных соединений.

Пайка мягким припоем
Пайка мягким припоем применяется для получения прочного шва при температуре до 450°C. Припои с температурой плавления не более 200°C называют также быстрыми.

Пайка твердым припоем
Пайка твердым припоем (высокотемпературная пайка) применяется для получения прочного соединения при температуре плавления выше 450°C (например, медный припой или комбинированный медноцинковый и серебряный припой). Дополнительные сведения о припоях можно найти в стандартах DIN EN ISO 9453, DIN EN ISO 12224, DIN EN 1044.

Применение пайки твердым припоем:
- пайка твердым припоем V-образных соединений: стальных листов при изготовлении кузовов, в том числе различного качества, и в случае большой разницы толщины стенок;
- пайка беззазорных соединений радиаторов, труб в процессе сборки.

Ликвация
Нагрев производится в проходных или вакуумных печах с определенными температурными и временными характеристиками. Перед помещением в печь компоненты закрепляются, и припой наносится в виде пасты.

Индукционная пайка
Нагрев локализуется посредством индукции.

Пайка открытым пламенем
Нагрев осуществляется отдельными горелками или системой газового нагрева. В зависимости от характера операций, могут применяться кислородно-ацетиленовые горелки (газосварочного типа) или паяльные лампы. Припой обычно подается сбоку в форме прутка. Флюс наносится отдельно или содержится в припое.

Пайка паяльником
Нагрев производится ручным или механическим паяльником. Паяльник может также использоваться для работы на предварительно луженых поверхностях.

Дополнительные процессы:
- пайка в соляной ванне;
- пайка окунанием;
- пайка электросопротивлением;
- дуговая пайка в среде защитного газа;
- плазменная пайка;
- лазерная пайка.

Пайка беззазорных соединений и пайка твердым припоем V-образных соединений
В отношении геометрии соединений и используемого флюса различаются пайка беззазорных соединений и пайка твердым припоем V-образных соединений.

Пайка беззазорных соединений
Зазор заполняется за счет капиллярного эффекта жидкого припоя. Прочность паяного соединения определяется исключительно прочностью основных материалов. Типичными процессами являются ликвация, пайка открытым пламенем и индукционная пайка.

Пайка твердым припоем V-образных соединений
Зазор заполняется припоем под действием силы тяжести. Прочность паяного соединения определяется прежде всего прочностью припоя. Типичными производственными процессами являются дуговая и лазерная пайка.

Клеевые соединения

Органические или неорганические клеевые составы позволяют получать неразъемные соединения металлических или неметаллических материалов. Клеевые составы могут применяться под давлением при комнатной температуре или при умеренном нагреве. Этот способ соединения частей основан на адгезии, когда физические и химические силы сцепления действуют на молекулярном уровне. Различают одно- и двухкомпонентные клеевые составы.

Однокомпонентные клеевые составы
Эти клеевые составы содержат все необходимые компоненты и готовы к применению.

Двухкомпонентные клеевые составы
Этот тип клея содержит второй компонент – отвердитель, инициирующий отвердение. К отвердителю добавляется катализатор.

Двухкомпонентные клеевые составы обычно используются для склейки металлов. Процесс отвердения заключается в полимеризации или поликонденсации под влиянием повышенной температуры и по истечении определенного времени. При этом происходит взаимное сцепление макромолекул. В зависимости от температуры отвердения различают холодную склейку (отвердение происходит при комнатной температуре) и горячую склейку (отвердение происходит при температурах порядка 100–200 °C).

Клеевые соединения следует разрабатывать таким образом, чтобы они подвергались исключительно сдвигающим нагрузкам. Практически единственным применением клеев являются соединения внахлест. Стыковых соединений, подвергающихся усилиям растяжения или сдвига, следует избегать.

Для улучшения эффекта склеивание металлов можно дополнить точечной сваркой или проникающей клепкой. При помощи точечной сварки компоненты скрепляются на время отвердевания клея. Этот метод также применим для уменьшения пиков напряжений между сварными точками, а также для уменьшения числа сварных точек. Такие соединения имеют повышенную конструктивную прочность, жесткость и демпфирующие свойства, возникающие под действием динамических нагрузок. Сварка производится, когда клеевой состав еще не затвердел;

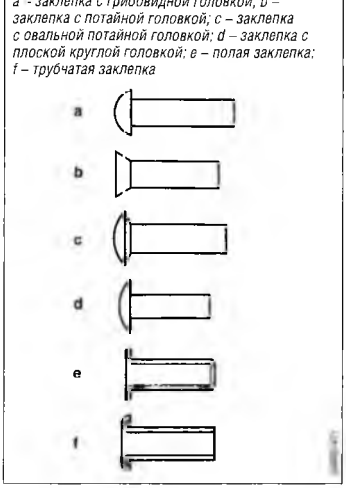
в противном случае он будет действовать как изолятор.

Основными клеями для металла являются:
- эпоксидные смолы;
- полиэфирные смолы;
- акриловые смолы;
- винилацетат;
- цемент для склеивания металлов.

Применение клеевых соединений в автомобильной промышленности

В автомобильной промышленности клеевые соединения стали стандартной технологией. Можно указать следующие области применения:
- кузов автомобиля: выпуклый шов и жесткие связи для закрепленных элементов;
- окрасочная линия: крепление элементов жесткости;
- сборочная линия: крепление изоляционных материалов, аппликаций, молдингов, опорного кронштейна зеркала к ветровому стеклу;
- изготовление отдельных деталей: приклеивание тормозных накладок к тормозным колодкам, производство безопасного трехслойного стекла, соединения резины с металлом для гашения колебаний.

Рис. 5. Формы заклепок;
a - заклепка с грибовидной головкой; b – заклепка с потайной головкой; c – заклепка с овальной потайной головкой; d – заклепка с плоской круглой головкой; e – полая заклепка; f – трубчатая заклепка



Заклепочные соединения

Классическая клепка

Процедура

Клепка применяется для получения неразъемного жесткого соединения между двумя или более деталями, изготовленными из одного или разных материалов. При этом соединяемые компоненты совместно сверлятся или пробиваются. Затем в качестве соединительного элемента в отверстие вставляется заклепка. В зависимости от конкретных способов клепки и их применения, заклепочные соединения можно разделить на следующие категории:
- неразъемные жесткие соединения (сильно нагруженные соединения, например, в изделиях машиностроения);
- неразъемные жесткие и герметичные (плотные) соединения (например, котлы и резервуары, находящиеся под давлением);
- уплотнения высокой герметичности (например, трубы, вакуумное оборудование).

Различают холодную и горячую клепку. Холодная клепка применяется для стальных, медных, алюминиевых заклепок и заклепок из медных сплавов диаметром до 10 мм. Для заклепок диаметром свыше 10 мм необходима горячая клепка.

Наиболее распространенными заклепками являются (см. рис. 5):
- заклепка с грибовидной головкой (DIN 660);
- заклепка с потайной головкой (DIN 661);
- овальная заклепка с потайной головкой (DIN 662);
- заклепка с плоской круглой головкой (DIN 674);
- полая заклепка (DIN 7339);
- трубчатая заклепка (DIN 7340).

Имеются также стандартизованные заклепки для специальных применений, например, взрывные заклепки или глухие заклепки. Потайная заклепка представляет собой полый элемент, который устанавливается на свое место кузнечным пробойником или аналогичным инструментом.

Заклепки часто используются также в качестве функциональных элементов. Для примера можно привести заклепочные гайки и заклепочные болты, служащие в качестве точек сболчивания.

Прочностные свойства и химический состав материалов для изготовления заклепок указаны в многочисленных национальных и международных стандартах. В целях предотвращения электрохимической коррозии рекомендуется, по возможности, использовать заклепки из того же материала, что и соединяемые компоненты.
В машиностроении, в частности, при производстве цистерн клепка вытесняется сваркой.

Достоинства и недостатки клепки в сравнении с другими технологиями соединения деталей:
- в отличие от сварки, клепка не производит закалку или молекулярные изменения в зоне соединения;
- отсутствуют деформации соединяемых деталей;
- возможно соединение разнородных материалов;
- имеет место ослабление соединяемых деталей заклепками;
- невозможно соединение торцов деталей;
- процесс клепки в целом более дорог, чем сварка во внезаводских условиях.

Применение клепки в автомобильной промышленности:
- заклепочные штифты/шарнирные оси (электрические стеклоподъемники, петли, рычажные механизмы стеклоочистителей);

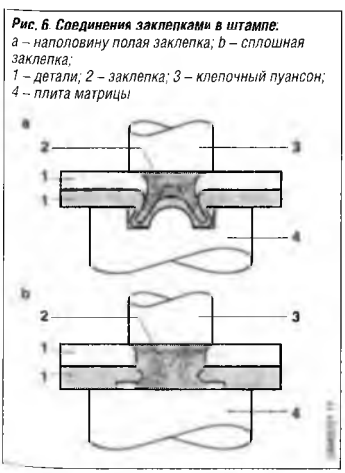


Рис. 6. Соединения заклепками в штампе.
a – наполовину полая заклепка; b – сплошная заклепка;
1 – детали; 2 – заклепка; 3 – клепочный пуансон; 4 – плита матрицы

- клепка усилительных пластин (во время ремонтных работ).

Соединение заклепками в штампе

Процедура

Технология соединения заклепками в штампе применяется для соединения твердых материалов при помощи заклепочных элементов (сплошных или наполовину полых заклепок) без предварительного сверления или прошивки в ходе объединенной операции резки и соединения. В этом процессе не требуются такие операции, как предварительное сверление отверстий под заклепки и клепка.

Соединение наполовину полыми заклепками

Первым этапом клепки наполовину полыми заклепками (рис. 6, a) является позиционирование точки соединения компонентов на (нижней) плите матрицы. Штамп клепальной машины опускается вниз и продавливает заклепку через верхний металлический лист в нижний за один ход. При выполнении таких операций обеспечивается расплющивание нижней части заклепки с целью образования крепежного элемента обычно без разрушения нижнего металлического листа.

Соединение сплошными заклепками

Первым этапом клепки сплошными заклепками (рис. 6, b) является позиционирование точки соединения компонентов на (нижней) плите матрицы. Верхняя часть вырубного штампа, имеющего прижим, опускается вниз, и штамп клепальной машины обеспечивает в соединяемых деталях запрессовывание заклепки в полученное отверстие за одну операцию штамповки.

Используемое оборудование

Для выполнения соединений используется гидравлическое оборудование; в оборудовании этого типа клепочный пуансон и матрица располагаются в очень жесткой раме С-образной формы. Заклепки могут подаваться в клепочный инструмент по отдельности или с использованием магазинных носителей.

Материалы

Твердость заклепок должна превосходить твердость соединяемых материалов. Наиболее распространенными материалами для заклепок являются сталь, нержавеющая сталь, медь и алюминий с различными покрытиями.

Описание:
- используется для соединения одинаковых и разнородных материалов (например, стали, пластмассы, алюминия), частей и панелей разной толщины и упругости, а также окрашенных металлических листов;
- отсутствует потребность в предварительной пробивке и/или сверлильных операциях, не требуется применение нагревательных или вакуумных устройств;
- максимальная общая толщина склеиваемых деталей составляет 6,5 мм для стали и 11 мм для алюминия;
- процесс клепки сопровождается минимальными выделением тепла и шумом;
- инструменты имеют длительный срок службы (установка приблизительно 300 000 заклепок) и обеспечивают постоянный уровень качества соединений на протяжении длительного времени;
- высокая надежность процесса благодаря мониторингу технологических параметров;
- потребность в высоких усилиях;
- большие размеры выступов клепочных инструментов возможны только в ограниченных условиях в связи с требованиями к жесткости.

Применение метода:
- сплошными заклепками производится соединение листового металла, например, стеклоподъемников;
- наполовину полыми заклепками соединяются кузовные изделия для легковых автомобилей, луженые изделия (для домашнего применения), металлы с композитными материалами (тепловые экраны).

Соединение методом принудительной деформации

Процессы

Соединение методом принудительной деформации (клинчинг) включает механические процессы соединения, в том числе продавливание, холодное осаживание и иногда также резка в ходе одной соединительной операции. Исходя из данного принципа, этот метод может быть отнесен к процессам соединения посредством формовки (см. DIN 8593-5).

Можно провести различие между процессами с резкой и без резки и процессами с формированием точки соединения круглой или прямоугольной формы.

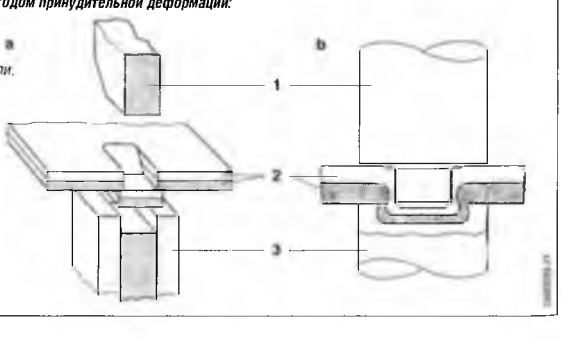
«Токс-клинчинг»

Некоторые варианты процесса в технической практике упоминаются в соответствии с оригинальными названиями производителей. Например, «токс-клинчинг» означает соединение принудительной деформацией при помощи круглого пуансона без резки (см. рис.7, b). Оборудование, используемое для токс-клинчинга, относительно небольшое. Диаметр соединения может изменяться в зависимости от потребности. График зависимости хода пуансона от прилагаемого усилия, типичный для «токс-клинчинга», можно разбить на пять характерных фаз (A – E) (см. рис. 8).

Соединение методом принудительной деформации

В настоящее время соединение методом принудительной деформации (рис. 7, a) может быть использовано для соединения панелей

Рис. 7. Соединение методом принудительной деформации:
a – клинчинг;
b – токс-клинчинг,
1 – пуансон,
2 – соединяемые детали,
3 – плита матрицы



толщиной до 3 мм; при этом общая толщина двух соединенных вместе панелей не должна превышать 5 мм. Материалы соединяемых панелей могут быть одинаковыми (например, сталь со сталью) или различными (например, сталь с цветным металлом). Кроме того, соединение принудительной деформацией можно применять для обработки окрашенных деталей и панелей с защитными покрытиями, а также клееных. Возможно получение большого числа соединенных этим способом деталей (до 50) в одном процессе (один ход пресса).

Достоинства и недостатки способа соединения принудительной деформацией:

- отсутствует необходимость в шумоизолирующем кожухе;
- метод токс-клинчинга не требует антикоррозионной защиты соединения;
- при выполнении совместно с резкой наблюдается частичное ухудшение антикоррозионных свойств;
- отсутствие деформаций, вызываемых тепловыми напряжениями;
- возможна обработка окрашенных деталей, панелей с нанесенными на них защитными покрытиями (смазки, пасты и т.п.), а также клееных деталей;
- возможно соединение панелей, изготовленных из разных материалов, например, стали с пластмассой;
- экономится энергия, т.к. нет таких затрат электроэнергии, как при сварке, и отсутствует потребность в охлаждении;
- на одной стороне соединения образуется утолщение, подобное головке заклепки, в то время как на противоположной стороне образуется соответствующее углубление.

Применение в автомобильной промышленности:

- стальные и алюминиевые кузова;
- кронштейны стеклоочистителей;
- крепеж внутренних панелей двери кузова;
- петли, замки;
- сидения.

Список литературы

[1] Fügetechnik Schweißtechnik, 7th Edition. DVS Media, 2007.
[2] DIN/DVS Taschenbuch 284, Schweißtechnik 7: Schweißtechnische Fertigung, Schweißverbindungen. DVS Media, 2009. [3] DIN 1910 – Welding and allied processes – Vocabulary – Part 100: Metal welding processes with additions to DIN EN 14610:2005.
[4] DIN/DVS Taschenbuch 283, Schweißtechnik 6: Strahlschweißen, Bolzenschweißen, Reibschweißen. DVS Media, 2009.
[5] DIN EN 1011 – Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 6: Laser beam welding; Part 7: Electron beam welding
[6] DIN/DVS Taschenbuch 196/1, Schweißtechnik 5: Hartlöten. DVS Media, 2008.
[7] DIN/DVS Taschenbuch 196/2, Schweißtechnik 12: Weichlöten, 1st Edition, Beuth-Verlag, 2008.
[8] DIN ISO 857 – Welding and allied processes – Vocabulary – Part 2: Soldering and brazing processes and related terms.

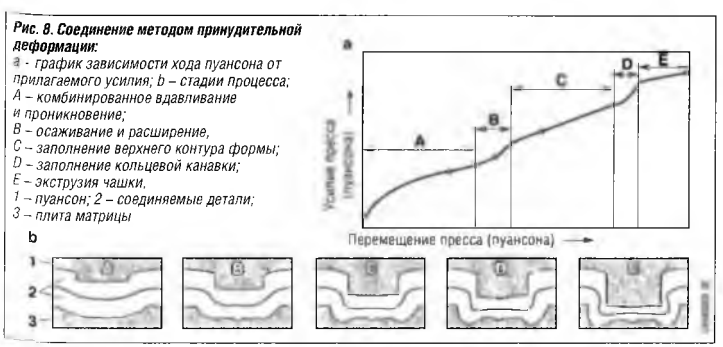


Рис. 8. Соединение методом принудительной деформации:
a – график зависимости хода пуансона от прилагаемого усилия; b – стадии процесса;
A – комбинированное вдавливание и проникновение;
B – осаживание и расширение,
C – заполнение верхнего контура формы;
D – заполнение кольцевой канавки;
E – экструзия чашки.
1 – пуансон; 2 – соединяемые детали;
3 – плита матрицы

Автомобилестроение, основные термины

Поведение автомобиля, основные термины

Основные принципы и термины

Понятие «поведение автомобиля» охватывает динамику его поперечных, прямолинейных и вертикальных перемещений. Так, динамика поперечных перемещений рассматривает поведение автомобиля под действием рулевого управления, динамика прямолинейного движений – разгона и торможения, а динамика вертикальных перемещений – перемещения частей автомобиля, вызываемого неровностями дороги. Объясняемые далее основные термины (величины и единицы измерения см. в табл. 1) описывают поведение автомобиля в диапазоне частот приблизительно до 8 Гц. Многие из этих величин определены в немецком стандарте DIN 70000 [1] и международном стандарте ISO 8855 [2]. Используемые величины можно разделить на три группы.

Кузов

Движение кузова в общем случае можно описать как движение твердого тела. Даже для кузовов кабриолетов отклонения от законов движения твердого тела имеют место только при частотах свыше 10–15 Гц.

Подвеска колес

Передние колеса имеют две степени свободы – в вертикальном направлении и в направлении поворота. Задние колеса, как правило имеют, только одну степень свободы в вертикальном направлении. На автомобилях с четырьмя управляемыми колесами задние колеса также имеют степень свободы в направлении поворота. Эти степени свободы определяются кинематикой и эластокинематикой осей. Кинематика оси описывает движение отдельных рычагов подвески как движения абсолютно твердых тел, в то время как эластокинематика описывает реакции осей автомобиля на воздействие различных сил и моментов.

Шины

Шины являются важнейшими компонентами, обеспечивающими контакт автомобиля с дорогой, генерирующими силы, необходимые для движения, торможения и рулевого управления во взаимодействии с дорогой.

Таблица 1. Параметры и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
α	Угол увода	градусы
β	Угол дрейфа	градусы
δ_H	Угол поворота рулевого колеса	градусы
δ_R	Угол поворота правого колеса	градусы
δ_L	Угол поворота левого колеса	градусы
δ_A	Угол поворота управляемых колес	градусы
ε_V	Угол продольного наклона вертикальной оси колеса, проходящей через центр колеса	градусы
ε_{BV}	Угол предотвращения клевка кузова	градусы
ε_{aV}	Угол предотвращения подъема передней части кузова	градусы
ψ	Угол рыскания	градусы
φ	Угол крена	градусы
Θ	Угол продольной качки	градусы
γ	Угол развала колес	градусы
δ	Угол поперечного наклона оси поворота колеса	градусы
τ	Угол продольного наклона оси поворота колеса	градусы
λ	Скольжение шины	–
λ_B	Распределение тормозных сил	–
ω_c	Угловая скорость колеса	$с^{-1}$
a_x	Продольное ускорение	м/с^2
a_y	Боковое ускорение	м/с^2
a_z	Вертикальное ускорение	м/с^2
a_t	Тангенциальное ускорение	м/с^2
a_r	Центростремительное ускорение	м/с^2
F_S	Боковая сила	Н
F_U	Продольная сила	Н
F_Z	Нагрузка на ось	Н
h	Высота центра тяжести	м
h_W	Высота полюса крена	м
i_S	Передаточное отношение рулевого механизма	–
l	Колесная база	м
M_H	Момент поворота рулевого колеса	Н · м
M_R	Стабилизирующий крутящий момент	Н · м
n_T	Смещение оси поворота колеса относительно точки контакта колеса с дорогой	м
n_λ	Продольное смещение оси поворота колеса по центру колеса	м
n_R	Продольное смещение боковой силы	м
r_σ	Поперечное смещение оси поворота колеса по центру колеса	м
r_{st}	Плечо рычага отклоняющей силы	м
r_λ	Радиус плеча обкатки	мм
r_{dyn}	Динамический радиус качения	м
s	Ширина колеи	м/с
v_x	Продольная скорость	м/с
v_y	Боковая скорость	м/с
v_z	Вертикальная скорость	м/с
v_{RAP}	Скорость в точке контакта колеса с дорогой	м/с
v_{RMP}	Скорость центра колеса	
X_A	Компенсация начального момента	–
X_B	Компенсация тормозного момента	–

Основные термины, относящиеся к кузову

Поступательное (равномерное) движение

Поведение кузова описывается тремя поступательными и тремя вращательными степенями свободы (см. рис. 1). В общем случае система координат (прямоугольная, правовинтовая система координат) имеет начало в центре тяжести автомобиля. Ось x направлена вперед, т.е. в направлении движения. Она расположена в плоскости, перпендикулярной к поверхности дороги. Эта плоскость называется центральной плоскостью автомобиля. Перпендикулярно к центральной плоскости автомобиля располагается ось y, направленная влево, глядя в направлении движения. Ось z направлена вверх. Поступательные движения имеют следующие наименования:

- в направлении оси x: прямолинейное движение;
- в направлении оси y: поперечное движение;
- в направлении оси z: подъем.

Поступательные скорости и ускорения

Производные поступательных перемещений по времени первого порядка определяют прямолинейную, поперечную и вертикальную составляющие скорости (v_x, v_y, v_z). Производные перемещений по времени второго порядка дают прямолинейное ускорение a_x, поперечное ускорение a_y и вертикальное ускорение a_z.

Угол дрейфа

В динамике центр тяжести кузова не всегда движется вдоль оси x, происходит и поперечное движение. Угол между центральной плоскостью автомобиля и траекторией движения называется углом дрейфа β (см. рис. 2). Он отсчитывается от центральной плоскости автомобиля в направлении траектории. Угол дрейфа вычисляется, исходя из скорости прямолинейного движения v_x и скорости поперечного движения v_y:

$$\beta = \arctan \frac{v_y}{v_x}$$

Поскольку скорость прямолинейного движения во время движения в прямом направлении по определению положительна, знак скорости поперечного движения определяет знак угла дрейфа.

Центростремительное и тангенциальное ускорение

Ускорение в горизонтальной плоскости, направленное вдоль мгновенной траектории движения автомобиля, раскладывается на центростремительное ускорение a_c и тангенциальное ускорение a_t. Центростремительное ускорение представляет собой составляющую, перпендикулярную к траектории, движения, в то время как тангенциальное ускорение является составляющей, направленной по касательной к траектории.

Рыскание, продольная качка и поперечная качка

Для описания вращательных движений введены следующие термины:

- поворот вокруг оси z называется рысканием и описывается углом ψ;
- поворот вокруг оси y называется продольной качкой и описывается углом θ,

Рис. 1. Поступательные и вращательные степени свободы кузова:
ψ – угол рыскания; φ – угол крена;
θ – угол поворота вокруг поперечной оси;
S – центр тяжести



Рис. 2. Угол дрейфа, центростремительное и тангенциальное ускорение:
β – угол дрейфа;
a_t – тангенциальное ускорение;
a_c – центростремительное ускорение;
v_x – продольная скорость;
v_y – боковая скорость



– поворот вокруг оси x называется поперечной качкой или креном и описывается углом φ.

Знаки этих углов соответствуют знакам в правовинтовой прямоугольной системе координат. Направления отсчета показаны на рис. 1. Часто во время маневрирования кузов одновременно движется вокруг более чем одной оси. Поскольку с математической точки зрения эти три направления поворота не являются коммутативными, в стандарте DIN 70000 определен следующий порядок:
1. Рыскание.
2. Продольная качка.
3. Поперечная качка (крен).

Вращательные скорости и ускорения
Производные вращательных перемещений по времени первого порядка определяют скорости рыскания, продольной и поперечной качки. Производные вращательных перемещений по времени второго порядка определяют ускорения рыскания, продольной и поперечной качки.

Момент рыскания, момент продольной качки и момент поперечной качки
Внешние силы, действующие на автомобиль, могут создавать момент относительно центра тяжести. Этот момент можно разбить на три составляющие. Составляющая, действующая вокруг оси z, называется моментом рыскания, вокруг оси y - моментом продольной качки и вокруг оси x - моментом поперечной качки.

Измеряемые переменные
При разработке конструкции автомобиля необходимо с высокой точностью измерять значения параметров, описывающих его поведение. В динамике поперечного движения поступательные ускорения и углы положения часто измеряются при помощи гиростабилизированных платформ. Абсолютные положения регистрируются измерительными системами GPS. Прямолинейные и поперечные ускорения и угол дрейфа измеряются при помощи бесконтактных датчиков скорости.

В динамике вертикального движения поступательные ускорения измеряются в различных точках кузова в каждом из трех направлений в пространстве. Используя эти данные, можно определить наиболее важные ускорения кузова, т.е. ускорения подъема, продольной и поперечной качки.

Основные термины, относящиеся к подвеске колес

Угол поворота рулевого колеса и момент поворота рулевого колеса
Угол поворота рулевого колеса δ_H - это угол поворота, измеряемый относительно положения прямолинейного движения. Угол считается положительным в левом направлении вращения.

Для изменения угла поворота рулевого колеса водитель должен приложить к нему вращающий момент. Этот момент называется моментом поворота рулевого колеса M_H и также является положительным в левом направлении вращения.

Угол поворота колес
Перемещение рулевого колеса вызывает поворот передних колес в одном направлении. При этом изменяются углы поворота правого и левого колес (δ_R и δ_L), соответственно. Угол поворота представляет собой угол между центральной плоскостью автомобиля и центральной плоскостью колеса, спроектированный на поверхность дороги (см. рис. 3). В случае поворота в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки, вокруг оси z угол схождения также является положительным.

На автомобилях с четырьмя управляемыми колесами поворачиваются также и задние колеса.

Угол поворота управляемых колес
При повороте рулевого колеса передние колеса поворачиваются на различные углы. Разница углов поворота колес при повороте рулевого колеса в крайнее положение может достигать нескольких градусов. При это угол поворота внутреннего колеса больше угла

Рис. 3. Угол поворота колес и угол поворота оси:
1 – центральная плоскость автомобиля;
2 – центральная плоскость колеса;
δ_L – угол поворота левого колеса;
δ_R – угол поворота правого колеса;
δ_A – угол поворота оси (угол поворота руля), средний угол поворота колес



поворота наружного колеса. Средний угол поворота называется углом поворота δ_A (см. рис. 3).

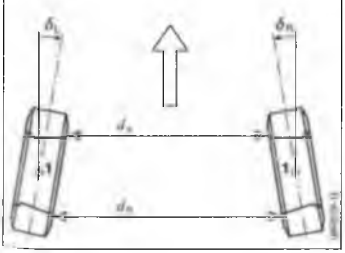
Передаточное отношение рулевого механизма
За счет рулевого механизма, а также кинематики передней оси угол поворота колес всегда значительно меньше угла поворота рулевого колеса. При отсутствии внешних сил или моментов и при незначительной нагрузке автомобиля передаточное отношение рулевого механизма i_s определяется следующим уравнением:

$$i_s = \frac{2\,\delta_H}{(\delta_L + \delta_R)}$$

Схождение и расхождение передних колес
Когда рулевое колесо находится в положении прямолинейного движения, углы поворота передних колес находятся в динамически благоприятном диапазоне от 0,1 до 0,3°. Когда расстояние между ободами колесных дисков перед центрами колес меньше этого же расстояния позади центров колес, имеет место схождение колес (см. рис. 4). Если ситуация противоположна, имеет место расхождение колес. Как схождение, так и расхождение указываются в градусах (°).

Термины схождение и расхождение применимы также к отдельно взятому колесу. В этом случае схождение означает, что колесо повернуто к центральной плоскости автомобиля, а расхождение – от центральной плоскости.

Рис. 4. Схождение передних колес:
1 – центр колеса; d_v – расстояние между ободами колесных дисков спереди, d_h – расстояние между ободами колесных дисков сзади, δ_L – угол схождения левого колеса; δ_R – угол схождения правого колеса, ⇐ – направление движения

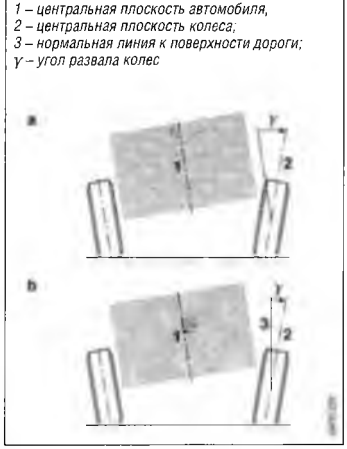


Угол развала колес
Угол развала колес γ – это угол между центральной плоскостью автомобиля и центральной плоскостью колеса, спроектированный на плоскость z-y. Угол развала является положительным, если расстояние между колесами и центральной плоскостью автомобиля вверху больше чем внизу (см. рис. 5, a). В связи с кинематикой оси угол развала колес относительно кузова зависит от хода пружин подвески.

В дополнение к этому определению также важной характеристикой является угол развала колес относительно дороги. Это угол между центральной плоскостью автомобиля и нормалью к поверхности дороги (см. рис. 5, b). Знак угла развала определяется в соответствии с правовинтовой прямоугольной системой координат. Если центральная плоскость автомобиля перпендикулярна к поверхности дороги, оба определения угла развала в отношении его величины равнозначны. В противном случае необходимо соблюдать точное определение.

Ось поворота колес
При повороте рулевого колеса колеса поворачиваются не вокруг оси z, а вокруг соб-

Рис. 5. Развал:
a – относительно кузова,
b – относительно дороги;
1 – центральная плоскость автомобиля,
2 – центральная плоскость колеса;
3 – нормальная линия к поверхности дороги;
γ – угол развала колес



ственной оси поворота колеса. Положение оси поворота колеса в основном определяется кинематикой оси (см. рис. 6 и 7).

Угол продольного наклона оси поворота колеса, смещение оси по центру колеса и расстояние между точкой пересечения оси поворота колеса с дорожной поверхностью и центром контакта колеса с дорогой

Если спроектировать колесо и ось поворота колеса на центральную плоскость автомобиля, ось поворота колеса будет наклонена на угол τ. Этот угол считается положительным, если верхний конец оси поворота колеса наклонен назад (см. рис. 6). В этой проекции ось поворота колеса обычно не проходит через центр колеса; на самом деле она смещена назад на расстояние n_v, называемое продольным смещением оси поворота колеса относительно центра колеса.

Расстояние между точкой контакта колеса с поверхностью дороги и точкой, в которой ось поворота колеса пересекает поверхность дороги, называется смещением оси поворота колеса. Если эта точка пересечения расположена перед центром колеса (рис. 6), смещение оси поворота колеса является положительным. Обычно величина этого смещения составляет от 15 до 30 мм.

Рис. 6. Положение оси поворота колеса в проекции на центральную плоскость автомобиля: *1 – центр колеса, 2 – ось поворота колеса, τ – угол продольного наклона оси поворота колеса; n_v – продольное смещение оси поворота колеса по центру колеса; n_τ – расстояние между точкой пересечения оси поворота колеса с дорожной поверхностью и центром контакта колеса с дорогой; ⇐ – направление движения*

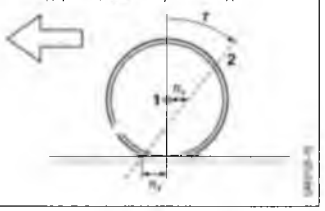


Рис. 7. Положение оси поворота колеса в проекции на поперечную плоскость автомобиля: *a – угол установки поперечного наклона оси поворота колеса и радиус плеча обкатки; b – поперечное смещение оси поворота колеса по центру колеса и плечо рычага отклоняющей силы; 1 – центр колеса, 2 – ось поворота колеса; 3 – центральная плоскость автомобиля, 4 – точка контакта колеса с дорогой; σ – угол поперечного наклона оси поворота колеса; r_σ – смещение оси поворота колеса по центру колеса, r_j – радиус плеча обкатки; r_{st} – плечо рычага отклоняющей силы*



Угол поперечного наклона оси поворота колеса, поперечное смещение оси поворота колеса по центру колеса, плечо рычага отклоняющей силы и радиус плеча обкатки

Если спроектировать колесо и ось поворота колеса на поперечную плоскость автомобиля, ось поворота колеса будет наклонена на угол σ (см. рис. 7, а). Угол поперечного наклона оси поворота колеса является положительным, когда ось наклонена к центру автомобиля. Углы установки поперечного наклона оси поворота колеса обычно являются положительными.

Расстояние между центром колеса и осью поворота колеса в направлении, параллельном дороге, называется поперечным смещением оси поворота колеса по центру колеса r_σ. Смещение является положительным, когда центр колеса находится дальше от центральной плоскости автомобиля, чем ось поворота колеса (см. рис. 7, b). Кратчайшее расстояние между центром колеса и осью поворота колеса r_{st} называется плечом рычага отклоняющей силы. Плечо рычага отклоняющей силы является положительным, если центр колеса находится дальше от центральной плоскости автомобиля, чем ось поворота колеса.

Оси расположены таким образом, что смещение оси поворота колеса по центру колеса и плечо рычага отклоняющей силы минимальны. Такая компоновка предотвращает возникновение отклоняющих сил в рулевом механизме.

Расстояние между точкой контакта колеса с поверхностью дороги и точкой, в которой ось поворота колеса пересекает поверхность

дороги называется радиусом плеча обкатки r_1 (рис. 7, а). Радиус плеча обкатки является положительным, если точка контакта колеса с дорогой находится дальше от центральной плоскости автомобиля, чем ось поворота колеса. Если радиус плеча обкатки положительный, под действием сил торможения колесо поворачивается в сторону расхождения. Такое поведение особенно благоприятно во время «торможения на кривой». Если радиус плеча обкатки отрицательный, под действием сил торможения колесо поворачивается в сторону схождения. Во время торможения в условиях различного сцепления колес с дорогой справа и слева такое поведение оси создает условия для более стабильной управляемости автомобиля. В связи с этими различными эффектами радиус плеча обкатки делается как можно меньшим.

Полюс поперечных перемещений, полюс крена, ось крена

Во время сжатия и обратной отдачи компонентов подвески положение колес определяется в основном кинематикой и эластокинематикой оси. Колесо перемещается в поперечном к направлению движения направлении вокруг полюса поперечных перемещений (см. рис. 8). Скорости перемещения точки контакта колеса с дорогой (v_{RAP}) и центра колеса (v_{RMF}) во время сжатия и обратной отдачи направлены перпендикулярно к линиям, соединяющим эти точки с полюсом поперечных перемещений. Во время сжатия и обратной отдачи положение полюса поперечных перемещений изменяется.

В случае малых поперечных ускорений кузов автомобиля перемещается вокруг полюса крена соответствующей оси (см. рис. 8). Полюс крена лежит в центральной плоскости автомобиля, на линии, соединяющей точку контакта колеса с дорогой, с полюсом поперечных перемещений, т.е. посередине ширины колеи ($s/2$). Высота полюса крена h_W может быть легко вычислена по формуле:

$$h_W = \frac{v_{RAPy}}{v_{RAPx}} \frac{s}{2}.$$

Высота полюса крена, как правило, составляет менее 120 мм. Чтобы избежать эффекта подпора (поддомкрачивания) в случае высоких поперечных ускорений, высота полюса крена уменьшается при сжатии. Полюс крена известен также под названием центра крена или мгновенного центра.

Линия, соединяющая полюс крена передней оси с полюсом крена задней оси, называется осью крена (см. рис. 9). Центр тяжести кузова обычно располагается выше оси крена. (Высота центра тяжести кузова для седанов составляет от 550 до 650 мм.) Это положение оси крена имеет место при малых поперечных ускорениях. В случае более высоких поперечных ускорений следует учитывать как регулировку подвески, так и поведение осей колес. В этом случае ось крена не обязательно лежит в центральной плоскости автомобиля.

Рис. 8. Полюс поперечных перемещений и полюс крена:
1 – центр колеса; 2 – центральная плоскость колеса;
3 – центральная плоскость автомобиля;
Q – полюс поперечных перемещений, W – полюс крена; s – ширина колеи; h_w – высота полюса крена; v_{RAP} – скорость в точке контакта, v_{RMP} – скорость центра колеса

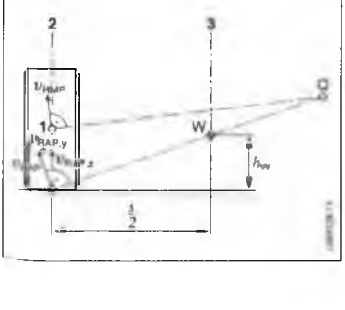
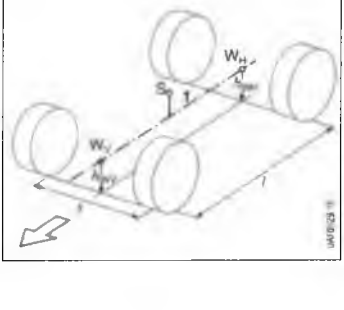


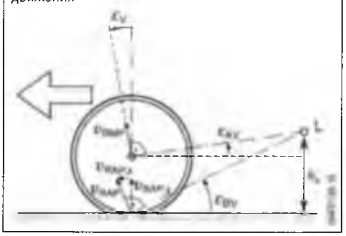
Рис. 9. Ось крена:
1 – ось крена;
S – центр тяжести; W_V – полюс крена передней оси;
W_H – полюс крена задней оси;
s – ширина колеи; l – колесная база;
h_{WV} – высота полюса крена передней оси,
h_{WH} – высота полюса крена задней оси;
⇐ – направление движения



Полюс продольных перемещений, полюс продольной качки, ось продольной качки, компенсация тормозного момента и компенсация начального момента

В проекции упругого перемещения оси на центральную плоскость автомобиля колесо перемещается вокруг полюса продольных перемещений (см. рис. 10). Во время сжатия центр колеса перемещается вверх под углом продольного наклона вертикальной оси, проходящей через центр колеса ε_V. Скорости в точке контакта колеса с дорогой ($v_{РАР}$) и центра колеса ($v_{РМР}$) во время сжатия и обратной отдачи направлены перпендикулярно к линиям, соединяющим их с полюсом продольных перемещений. Положение полюса продольных перемещений во время сжатия и обратной отдачи может изменяться. Угол между линией, соединяющей точку контакта колеса с дорогой с полюсом продольных перемещений, и дорогой называется углом предотвращения клевка кузова ε_{BV}. Угол между линией, соединяющей центр колеса с полюсом продольных перемещений и линией, параллельной дороге, называется углом предотвращения подъема передней части кузова ε_{AV}.

Рис. 10. Полюс продольных перемещений, угол предотвращения подъема передней части кузова и угол предотвращения клевка кузова:
L – полюс продольных перемещений;
ε_V – угол продольного наклона по центру колеса,
ε_{BV} – угол предотвращения клевка кузова ,
ε_{AV} – угол предотвращения подъема передней части кузова, $v_{РАР}$ – скорость в точке контакта; $v_{РМР}$ – скорость центра колеса; ⇐ – направление движения



Полюс продольных перемещений передней оси находится позади передних колес, а полюс продольных перемещений задних колес находится перед задними колесами (см. рис. 11).

Во время торможения автомобиля нагрузка на переднюю ось увеличивается на ΔF_z, а нагрузка на заднюю ось уменьшается на ΔF_z. При этом к центру тяжести автомобиля прилагается сила $F = ma$. При коэффициенте распределения сил торможения λ_B к передней и задней осям прилагаются силы торможения $F_{xV} = \lambda_B F_x$ и $F_{xH} = (1 - \lambda_B) F_x$, соответственно. В оптимальном случае, когда результирующая сила F_{xV} и ΔF_z, действующая на переднюю ось, проходит точно через полюс продольных перемещений

Рис. 11. Полюс продольной качки:
S – центр тяжести; N – полюс продольной качки;
L_V – полюс продольных перемещений передней оси, L_H – полюс продольных перемещений задней оси;
m – масса; a – ускорение;
F_{xV} – сила торможения передней оси; F_{xH} – сила торможения задней оси; ΔF_z – изменение нагрузки на ось;
l – колесная база, h – высота центра тяжести; h_V – высота переднего полюса продольных перемещений, h_H – высота заднего полюса продольных перемещений;
ε_{BV} – угол предотвращения клевка кузова; ε_{BH} – угол предотвращения подъема передней части кузова;
⇐ – направление движения



и аналогично для задней оси, движений пружинных элементов подвески и, соответственно, кузова не происходит. Оптимальные значения углов предотвращения клевка кузова и предотвращения подъема передней части кузова равны:

$$\tan(\varepsilon_{BV,opt}) = \frac{1}{\lambda_B} \frac{h}{l},$$

$$\tan(\varepsilon_{BH,opt}) = \frac{1}{(1-\lambda_B)} \frac{h}{l},$$

при колесной базе l и высоте центра тяжести h.

Две линии, соединяющие точки контакта колес с дорогой с полюсами продольных перемещений, соединяются в точке полюса продольной качки N (рис. 11). Полюс продольной качки N всегда находится ниже центра тяжести, что позволяет во время торможения всегда обеспечить ожидаемое движение продольной качки автомобиля, направленное назад. Ось продольной качки проходит через полюс продольной качки и перпендикулярна центральной плоскости автомобиля. Компенсация тормозного момента X_{BV} и X_{BH} представляет собой меру оптимизации процесса торможения. При этом применимо следующее:

$$X_{BV} = \frac{\tan(\varepsilon_{BV})}{\tan(\varepsilon_{BV,opt})} 100\ \%,$$

$$X_{BH} = \frac{\tan(\varepsilon_{BH})}{\tan(\varepsilon_{BH,opt})} 100\ \%.$$

То же самое относится к ускорению. При этом необходимо учитывать тип привода (полный, передний или задний привод), а также тот факт, что сила тяги прилагается к центру колеса. В общем случае полного привода значения компенсации начального момента X_{AV} и X_{AH} составляют:

$$X_{AV} = \frac{\tan(\varepsilon_{AV})}{\tan(\varepsilon_{AV,opt})} 100\ \%,$$

$$X_{AH} = \frac{\tan(\varepsilon_{AH})}{\tan(\varepsilon_{AH,opt})} 100\ \%.$$

Измеряемые переменные

Угол и момент поворота рулевого колеса измеряются при помощи специальных мерных роликов. Если точность измерений достаточна, можно использовать датчик угла поворота рулевого колеса, устанавливаемый на многих автомобилях в качестве стандартного оборудования.

Для измерения углов схождения и развала колес могут использоваться как мобильные, так и стационарные специальные измерительные устройства. Как правило, эти углы измеряются на специальных испытательных стендах.

Специальные стенды также используются для измерения угла поворота оси рулевой колонки и передаточного отношения рулевого механизма.

Переменные величины, характеризующие положение оси поворота колеса, непосредственно не измеряются. Часто посредством геометрических измерений вычисляются следующие переменные: угол продольного наклона оси поворота колеса, продольное смещение оси поворота колеса по центру колеса, смещение оси поворота колеса относительно точки контакта колеса с дорогой, угол установки продольного наклона оси поворота колеса, плечо рычага отклоняющей силы и радиус плеча обкатки. Положение полюса крена можно определить посредством измерения изменения ширины колеи во время возвратно-поступательных перемещений при сжатии и обратной отдаче оси колес. Положение оси крена определяется по положениям полюсов крена передней и задней осей.

Положения полюсов продольной качки и степени компенсации начального и тормозного моментов непосредственно не измеряются; они определяются по измеренным положениям кинематических точек осей. То же самое относится к продольному наклону по центру колеса и углам предотвращения клевка кузова и подъема передней части кузова.

Колеса, основные термины

Наиболее важные внешние силы и моменты, воздействующие на автомобиль, возникают во время передачи сил между колесами и поверхностью дороги. К ним следует добавить силу ветра, которая также может воздействовать на автомобиль.



Рис. 12. *Боковая и продольная силы:*
1 – точка контакта колеса с дорогой;
F_U – продольная сила;
F_S – боковая сила,
M_R – стабилизирующий крутящий момент колеса

Область контакта колеса

Передача сил между колесом и поверхностью дороги за счет трения происходит в области контакта колеса. Двумя наиболее важными видами трения являются трение сцепления (за счет сил межмолекулярного сцепления) и гистерезисное трение (за счет сил механического сцепления).

Боковая сила, продольная сила

Силы могут генерироваться в плоскости дороги за счет трения. Боковая сила F_S – это сила, перпендикулярная к центральной плоскости колеса; продольная сила F_U лежит в центральной плоскости колеса (рис. 12). В общем случае точной точкой приложения сил не является точка контакта колеса с дорогой, поэтому имеют место моменты, действующие относительно точки контакта (см. «Стабилизирующий крутящий момент»).

Нагрузка на колесо и угол увода

Когда боковая и продольная силы возникают одновременно, они могут оказывать взаимное влияние друг на друга. Ситуация, когда боковая и продольная силы возникают, но не комбинируются, рассмотрена ниже. Генерируемая боковая сила F_S зависит от нагрузки на колесо и угла увода α. Зависимость боковой силы F_S от скорости в общем случае можно проигнорировать. Нагрузка на колесо – это сила, с которой центр колеса прижимается к плоскости дорожной поверхности. Угол увода α – это угол между направлением движения точки контакта колеса с поверхностью дороги и центральной плоскостью колеса (рис. 13).

Когда нагрузка на колесо остается постоянной, а угол увода α увеличивается, боковая сила сначала линейно возрастает. Боковая сила достигает максимального значения при угле увода приблизительно 5 °, а затем несколько снижается (рис. 14).

Стабилизирующий крутящий момент и продольное смещение боковой силы

При малых углах увода точка приложения боковой силы находится позади точки контакта колеса с поверхностью. При увеличении угла увода точка приложения боковой силы последовательно сдвигается в направлении точки контакта и может оказаться даже впереди нее. Расстояние n_R между точкой приложения боковой силы и точкой контакта колеса с дорогой называется продольным смещением боковой силы. Следовательно, боковая сила создает момент вокруг вертикальной оси колеса – стабилизирующий крутящий момент M_R.

$$M_R = F_S \, n_R \, .$$

При постоянной нагрузке на колесо это дает зависимость стабилизирующего крутящего момента от угла увода, показанную на рис. 15.

Когда стабилизирующий крутящий момент положительный, это помогает уменьшить величину угла увода. Это способствует возврату повернутых колес в положение, соответствующее прямолинейному движению автомобиля при отпускании рулевого колеса.

Скольжение и радиус качения

Аналогично углу увода α для боковой силы F_S, скольжение λ является переменной, которая при постоянной нагрузке на колесо определяет величину продольной силы F_u. Скольжение возникает, когда скорость v_{xR}, с которой центр колеса движется в продольном направлении, отличается от окружной скорости v_U. Окружная

Рис. 13. Угол увода:
F_S – боковая сила;
M_R – стабилизирующий крутящий момент;
α – угол увода;
R – точка контакт колеса с дорогой

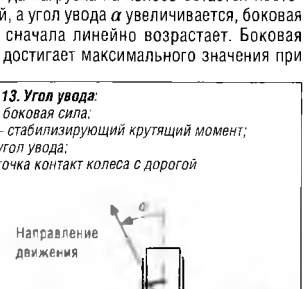
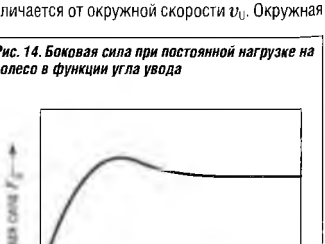


Рис. 14. Боковая сила при постоянной нагрузке на колесо в функции угла увода



скорость вычисляется по угловой скорости колеса ω_R и динамическому радиусу качения r_{dyn}:

$$v_U = \omega_R \, r_{dyn}.$$

Необходимо различать статические и динамические радиусы качения. Статический радиус качения – это кратчайшее расстояние между центром колеса и точкой контакта колеса с дорогой. Динамический радиус качения r_{dyn} вычисляется, исходя из длины окружности U, как:

$$r_{dyn} = \frac{U}{2\pi}.$$

Скольжение λ_A для сил тяги определяется как:

$$\lambda_A = \frac{\omega_R \, r_{dyn} - v_{xR}}{\omega_R \, r_{dyn}}$$

Аналогично скольжение λ_B для сил торможения определяется как:

$$\lambda_B = \frac{\omega_R \, r_{dyn} - v_{xR}}{v_{xR}}.$$

В соответствии с этим определением, скольжение при разгоне (тяговое скольжение) всегда положительное, а при торможении – отрицательное. Эти два определения скольжения означают, что когда колесо заблокировано ($\omega_R = 0$, $\lambda_B = -1$), имеет место скольжение –100 %, а когда оно пробуксовывает ($v_{xR} = 0$, $\lambda_A = 1$) величина скольжения составляет 100 %.

Если тяговое проскальзывание увеличивается при постоянной нагрузке на колесо, сила тяги (продольная сила) линейно возрастает. При тяговом проскальзывании, равном приблизительно 10 %, продольная сила достигает максимального значения, а затем снижается (см. рис. 16). То же самое относится к скольжению при торможении. Здесь максимальная тормозная сила создается при скольжении приблизительно –10 %.

Измеряемые переменные

Угол увода α измеряется вдоль линий, аналогичных линиям угла дрейфа, при помощи двух бесконтактных датчиков скорости.

Скорость вращения колеса и продольная скорость измеряются для определения скольжения λ.

Динамический радиус качения r_{dyn} определяется на испытательных стендах.

Стабилизирующий крутящий момент M_R, боковая сила F_S и продольная сила F_U могут быть измерены во время движения при помощи многокомпонентных измерительных роликов. Поскольку это очень дорогостоящая операция, силы и моменты, воздействующие на колеса, обычно измеряются на стационарных испытательных стендах или определяются на специальных автомобилях непосредственно на дороге. До настоящего времени точное измерение сил и моментов, воздействующих на колеса, сопровождалось большим количеством сбоев измерительных систем.

Список литературы

[1] DIN 70000 Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary.
[2] ISO 8855 Road vehicles – Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary.
[3] Heissing, B; Ersoy, M. (Издатели): Fahrwerkhandbuch. Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

Рис. 15. Стабилизирующий крутящий момент шины при постоянной нагрузке на колесо в функции угла увода

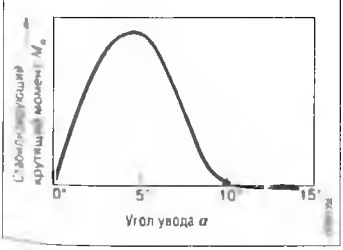
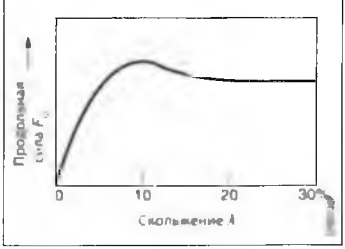


Рис. 16. Продольная сила при постоянной нагрузке на колесо в функции скольжения



Динамика автомобиля

Динамика прямолинейного движения

Общее сопротивление движению

Сопротивление движению вычисляется как (рис. 1):

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{St}.$$

Мощность, которая должна поступить на ведущие колеса автомобиля для преодоления сопротивления движению (силы сопротивления движению), равна:

$P_W = F_W v$ или

$$P_W = \frac{F_w v}{3\,600},$$

где P_W в кВт, F_W в Н, v в км/ч.

Сопротивление качению

Является следствием возникающих процессов деформации в зоне контакта шины с дорогой. При этом применимо следующее:

$$F_{Ro} = f\ G\ \cos\alpha \approx f m g \cos\alpha.$$

Приближенный расчет сопротивления качению может быть выполнен путем использования коэффициентов, представленных в приведенной ниже таблице 2 и на рис. 2.

Увеличение коэффициента сопротивления качению f прямо пропорционально уровню деформации и обратно пропорционально радиусу шины. Следовательно, коэффициент будет увеличиваться при увеличении нагрузки, скорости и при снижении давления в шине.

Рис. 1. Силы сопротивления движению:
S – центр тяжести; α – угол уклона; F_L – аэродинамическое сопротивление; F_{Ro} – сопротивление качению; F_{St} – сопротивление движению на подъем; G – вес автомобиля



Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
a	Максимальное поперечное сечение автомобиля	м²
a	Ускорение, торможение (замедление)	м/с²
c_W	Коэффициент аэродинамического сопротивления	–
F	Сила тяги	Н
F_{cf}	Центробежная сила	Н
F_L	Аэродинамическое сопротивление	Н
F_{Ro}	Сопротивление качению	Н
F_{St}	Сопротивление движению на подъем	Н
F_W	Сила сопротивления движению	Н
f	Коэффициент сопротивления качению	–
G	Вес = $m g$	Н
G_B	Сумма сил, действующих на ведущие или затормаживаемые колеса	Н
g	Ускорение силы тяжести = 9,81 м/с² ≈ 10 м/с²	м/с²
I	Передаточное отношение трансмиссии между двигателем и ведущими колесами	–
M	Эффективный крутящий момент двигателя	Н·м
m	Масса автомобиля	кг
n	Частота вращения коленчатого вала двигателя	мин⁻¹
P	Мощность	Вт
P_W	Движущая мощность	Вт
p	Продольный уклон дороги (= 100 · tan α)	%
r	Динамический радиус шины	м
s	Пройденное расстояние	м
t	Время	с
v	Скорость движения	м/с
v_0	Скорость встречного ветра	м/с
W	Работа	Дж
α	Угол уклона	°
μ_0	Коэффициент трения покоя	–

Дополнительные символы и единицы измерения приведены в тексте.

При прохождении поворотов сопротивление качению увеличивается за счет добавочного сопротивления повороту:

$$F_K = f_K \; G \; .$$

Коэффициент сопротивления повороту f_k является функцией скорости движения автомобиля, радиуса поворота, геометрических характеристик подвески автомобиля, типа шин, давления в шинах и поведения автомобиля под действием поперечного ускорения.

Аэродинамическое сопротивление
Определяется по формуле:

$$F_L = 0{,}5 \; \rho \cdot c_w \cdot A \; (v + v_0)^2 \text{ или}$$

$$F_L = 0{,}0386 \; \rho \; c_w \; A \; (v + v_0)^2 \, ,$$

где v в км/ч, F_L в Н, ρ в кг/м³, A в м², плотность воздуха ρ = 1,202 кг/м³ на высоте 200 м.

Аэродинамическое сопротивление:

$$P_L = F_L \; v = 0{,}5 \; \rho \; c_w \; A \; v \; (v + v_0)^2$$

или

$$P_L = 12{,}9 \cdot 10^{-6} \; c_w \; A \; v \; (v + v_0)^2$$

где P_L в кВт, F_L в Н, v и v_0 в км/ч, A в м², ρ = 1,202 кг/м³. Максимальное поперечное сечение автомобиля:

$A \approx 0{,}9 \times$ ширина колеи $\times$ высота.

Таблица 2. Коэффициенты сопротивления качению

Поверхность дороги	Коэффициент сопротивления качению f
Качение легковой пневматической шины по:	
мостовой, мощеной крупными брусками	0,013
мостовой, мощеной мелкими брусками	0,013
асфальту, асфальтобетону,	0,011
укатанному гравийному покрытию,	0,02
гудронированному щебеночному покрытию,	0,025
немощеной дороге,	0,05
бездорожью	0,1–0,35
Качение грузовой пневматической шины по бетону, асфальту	0,006–0,01
колеса с грунтозацепами	
На бездорожье	0,14–0,24
Гусеничный трактор на бездорожье	0,07–0,12
Колесо на железнодорожном рельсе	0,001–0,002

Рис. 2. Сопротивление качению радиальных шин по ровной, горизонтальной дороге при нормальных нагрузке и внутреннем давлении



Таблица 3 Эмпирическое определение коэффициентов аэродинамического сопротивления и сопротивления качению

	Первый заезд (с высокой скоростью)	Второй заезд (с низкой скоростью)
Начальная скорость Конечная скорость Интервал между v_a и v_b	v_{a1} = 60 км/ч v_{b1} = 55 км/ч t_1 = 7,8 с	v_{a2} = 15 км/ч v_{b2} = 10 км/ч t_2 = 12,2 с
Средняя скорость	$v_1 = \frac{v_{a1} + v_{b1}}{2}$ = 57,5 км/ч	$v_2 = \frac{v_{a2} + v_{b2}}{2}$ = 12,5 км/ч
Среднее замедление за остановочный путь	$a_1 = \frac{v_{a1} - v_{b1}}{t_1}$ = 0,64 км/ч / с	$a_2 = \frac{v_{a2} - v_{b2}}{t_2}$ = 0,41 км/ч / с
Коэффициент аэродинамического сопротивления	$c_w = \frac{13\,m \; (a_1 - a_2)}{A \; (v_1^2 - v_2^2)}$ = 0,29 (при m = 1450 кг, A = 2,2 м²)	
Коэффициент сопротивления качению	$f = \frac{28{,}2(a_2 \; v_1^2 - a_1 \; v_2^2)}{10^3 \cdot (v_1^2 - v_2^2)}$ = 0,011	

Таблица 4 Коэффициент аэродинамического сопротивления и мощность, затрачиваемая на преодоление аэродинамического сопротивления, для различных типов кузова

	Коэффициент аэродинамического сопротивления	Мощность аэродинамического сопротивления, кВт, означает: значения для $A = 2$ м² при различных скоростях [1]			
	c_W	40 км/ч	80 км/ч	120 км/ч	160 км/ч
 Кабриолет	0,33 – 0,50	0,70	5,3	18	42
 Внедорожный автомобиль	0,35 – 0,50	0,71	5,5	19	44
 Седан (обычной формы)	0,26 – 0,35	0,50	3,8	13	31
 Универсал	0,30 – 0,34	0,52	4,1	14	33
 Кузов клинообразной формы, фары и бамперы встроены в кузов, колеса закрыты, днище обшито панелями, оптимизированная обтекаемость	0,3 – 0,4	0,58	4,6	16	37
 Фары и бамперы встроены в кузов, днище обшито панелями	0,2 – 0,25	0,37	3,0	10	24
 Обратная клинообразная форма кузова (минимальное сечение в задней части)	0,23	0,38	3,0	10	24
 Оптимальная обтекаемость	0,15 – 0,20	0,29	2,3	7,8	18
Грузовые автомобили, тягачи с прицепами	0,8 – 1,5	–	–	–	–
Мотоциклы	0,6 – 0,7	–	–	–	–
Автобусы	0,6 – 0,7	–	–	–	–
Автобусы с обтекаемой формой кузова	0,3 – 0,4	–	–	–	–

UKF3006-1E

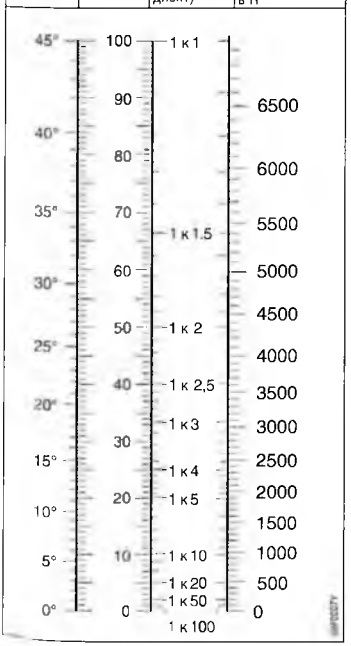
[1] При отсутствии встречного ветра ($v_0 = 0$)

Эмпирическое определение коэффициентов аэродинамического сопротивления и сопротивления качению

Автомобиль движется накатом на нейтральной передаче в условиях безветрия по ровной дороге. Для двух заданных значений скоростей движения, v_1 (высокая скорость) и v_2 (малая скорость), замеряется время, необходимое, чтобы автомобиль при этих условиях замедлил свое движение. Эта информация используется для расчета средних замедлений a_1 и a_2. Формулы и примеры из табл. 3 приведены для автомобиля массой m = 1450 кг с площадью поперечного сечения A = 2,2 м².

Таблица 5. Угол уклона и сопротивление движению на подъем

Угол уклона α	Уклон		Сопротивление движению на подъем при m = 1000 кг в Н
	p в %	Отношение (градиент)	



Этот метод применим для скоростей движения автомобиля до 100 км/ч.

Сопротивление движению автомобиля на подъем и силы, действующие на автомобиль при движении под уклон

Сопротивление движению на подъем (F_{St} со знаком плюс) и силы, действующие на автомобиль при движении под уклон (F_{St} со знаком минус) рассчитываются следующим образом:

$$F_{St} = G \sin\alpha = m\,g \sin\alpha$$

или приближенно:

$$F_{St} \approx 0{,}01\; m\,g\,p,$$

Эти уравнения применимы к уклонам до $p \leq 20\,\%$, поскольку при малых углах применимо следующее:

$\sin\alpha \approx \tan\alpha$ (погрешность менее 2 %).

Мощность, затрачиваемая на преодоление подъема, равна:

$P_{St} = F_{St}\; v$ или

если P_{St} измеряется в кВт, F_{St} в Н и v в км/ч:

$$P_{St} = \frac{F_{St}\,v}{3\,600} = \frac{m\,g\,v \sin\alpha}{3\,600}$$

Таблица 6. Сопротивление движению на подъем и мощность, затрачиваемая на преодоление подъема

Все значения рассчитаны для m = 1000 кг					
Сопротивление движению на подъем F_{St} в Н	Мощность, затрачиваемая на преодоление подъема P_{St} в кВт при различных скоростях				
	20 км/ч	30 км/ч	40 км/ч	50 км/ч	60 км/ч
6500	36	54	72	–	–
6000	33	50	67	–	–
5500	31	46	61	–	–
5000	28	42	56	69	–
4500	25	37	50	62	–
4000	22	33	44	56	67
3500	19	29	39	49	58
3000	17	25	33	42	50
2500	14	21	28	35	42
2000	11	17	22	28	33
1500	8,3	12	17	21	25
1000	5,6	8,3	11	14	17
500	2,3	4,2	5,6	6,9	8,3
0	0	0	0	0	0

или приближенно:

$$P_{St} = \frac{m\ g\ p\ v}{360\ 000}.$$

Продольный уклон дороги равен:

$p = (h/l) \cdot 100\ \%$ или
$p = (\tan \alpha) \cdot 100\ \%$,

где h соответствует проекции наклонной поверхности l на вертикальную ось.

В англоязычных странах *продольный уклон* определяется отношением 1 в $100/p$.

Например, при p =50% отношение 1 к 2.

Пример вычисления силы тяги и мощности, затрачиваемой на преодоление подъема
Для преодоления подъема с уклоном p = 21 %, автомобилю массой 1500 кг потребуется сила тяги на колесах приблизительно 1,5 × 2000 Н = 3000 Н (значение из табл. 5) и при v = 40 км/ч мощность, затрачиваемая на преодоление подъема, приблизительно 1,5 × 22 кВт = 31 кВт (значение из табл. 6).

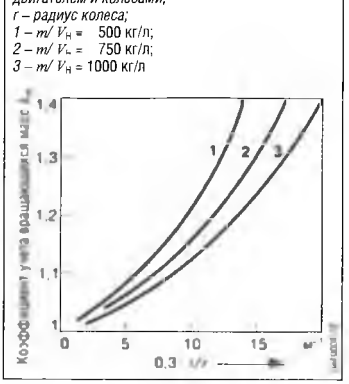
Сила тяги
Чем больше крутящий момент двигателя M и общее передаточное число трансмиссии i между двигателем и ведущими колесами, и чем ниже потери мощности в трансмиссии, тем выше сила тяги F на ведущих колесах автомобиля.

$$F = \frac{M\ i}{r} \cdot \eta \quad \text{или} \quad F = \frac{P\ \eta}{v}.$$

η – к.п.д. привода. Для двигателя продольного расположения $\eta \approx 0{,}88 - 0{,}92$, для двигателя поперечного расположения $\eta \approx 0{,}91 - 0{,}95$.

Сила тяги частично затрачивается на преодоление сопротивления движению. При большом сопротивлении движению, имеющем место на подъемах, следует включать в коробке передач пониженную передачу (т. е. увеличивать передаточное число трансмиссии).

Рис. 3. Определение коэффициента учета вращающихся масс k_m:
$V_н$ – рабочий объем двигателя в литрах;
m – масса автомобиля;
i – общее передаточное отношение между двигателем и колесами;
r – радиус колеса;
1 – $m/V_н$ = 500 кг/л;
2 – $m/V_н$ = 750 кг/л;
3 – $m/V_н$ = 1000 кг/л



Частота вращения коленчатого вала двигателя и скорость автомобиля
Частота вращения коленчатого вала вычисляется как:

$$n = \frac{60\ v\ i}{2\ \pi\ r},$$

или при v в км/ч:

$$n = \frac{1\,000\ v\ i}{2\ \pi\ 60\ r}.$$

Ускорение
Избыточная сила $F - F_W$ вызывает ускорение автомобиля. Или замедление, когда F_W превышает F.

$$a = \frac{F - F_W}{k_m\ m} \quad \text{или} \quad a = \frac{P\ \eta - P_W}{v\ k_m\ m}.$$

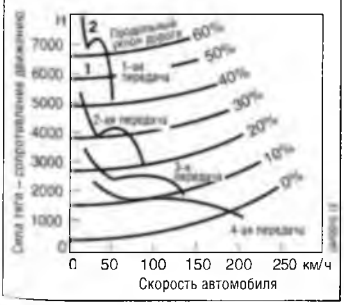
Коэффициент учета вращающихся масс k_m (рис. 3) позволяет учесть дополнительное увеличение инерционных масс автомобиля из-за наличия вращающихся частей (колеса, маховик, коленчатый вал и т. п.).

Сила тяги и скорость автомобилей с автоматической трансмиссией
Когда уравнение силы тяги применяется для автомобилей с автоматической трансмиссией с гидротрансформатором или гидромуфтой, крутящий момент двигателя заменяется крутящим моментом турбины гидротрансформатора, а частота вращения коленчатого вала двигателя – частотой вращения турбины гидротрансформатора. Используя кривую характеристики гидротрансформатора, можно определить зависимость между

$M_{Turb} = f(n_{Turb})$ и скоростной характеристикой двигателя $M_{Mot} = f(n_{Mot})$.

Силовой баланс для отдельных передач в функции скорости движения может быть определена из диаграммы силы тяги/сопротивления движению (рис. 4). На диаграмме можно увидеть точки излома, типичные для гидротрансформатора, возникающие вследствие мультипликации крутящего момента. Максимальную скорость в каждом случае для данной передачи можно определить по точкам пересечения линий тягового усилия с линиями сопротивления движению.

Рис. 4. График силового баланса для легкового автомобиля с автоматической трансмиссией с гидротрансформатором при полном открытии дроссельной заслонки:
1 – линии сопротивления движению для различных уклонов, 2 – линии тягового усилия для различных передач



Сцепление шины с дорогой

Коэффициент сцепления, называемый также коэффициентом трения покоя в зоне контакта шины с дорогой, определяется скоростью движения автомобиля, состоянием шин и состоянием поверхности дороги (см. табл. 7). Приведенные в таблице данные применимы для асфальтобетонных и гудронированных щебеночных покрытий в хорошем состоянии. Коэффициент трения скольжения (при заблокированных колесах) обычно ниже, чем коэффициент сцепления.

Специальные резиновые составы, используемые в шинах для гоночных автомобилей, позволяют обеспечить коэффициент сцепления вплоть до 1,8.

Рис. 5. Аквапланирование:
1 – шина; 2 – клин воды, 3 – поверхность дороги

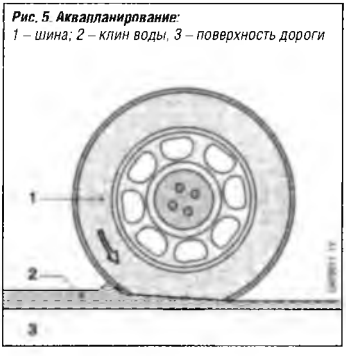


Таблица 7. Коэффициенты трения покоя для пневматических шин на различных поверхностях дороги

Скорость автомобиля в км/ч	Состояние шин	Состояние поверхности дороги				
		Без смазки	Слой воды толщиной прибл. 0,2 мм	Сильный дождь, слой воды толщиной прибл 1 мм	Лужи, слой воды толщиной прибл. 2 мм	Обледенение (гололед)
		Коэффициент статического трения μ_r				
50	новые	0,85	0,65	0,55	0,5	0,1 и менее
	изношенные[1]	1	0,5	0,4	0,25	
90	новые	0,8	0,6	0,3	0,05	–
	изношенные[1]	0,95	0,2	0,1	0,05	
130	новые	0,75	0,55	0,2	0	–
	изношены[1]	0,9	0,2	0,1	0	

[1] Износ до глубины протектора ≥ 1,6 мм (допустимый в Германии минимум в соответствии с § 36.2 StVZO)

Аквапланирование

Аквапланирование сильно влияет на контакт шины с дорогой. Это такое состояние, при котором пленка воды разделяет шину и поверхность дороги (рис. 5). Оно происходит, когда давление клина воды, не вытесненной из зоны контакта шины с дорогой, поднимает шину над дорогой. Склонность к аквапланированию зависит от толщины водяной пленки на дорожной поверхности, скорости движения автомобиля, формы рисунка протектора, его износа и давления, оказываемого шиной на дорогу. Широкопрофильные шины более подвержены аквапланированию. Аквапланирующий автомобиль не может передавать на поверхность дороги силы, требуемые для управления и торможения, что может стать причиной заноса.

Таблица 8. Ускорение и торможение

Параметр	Уравнения для v в м/с	Уравнения для v в км/ч
Ускорение или торможение (замедление) в м/с²	$a = \frac{v^2}{2s} = \frac{v}{t} = \frac{2s}{t^2}$	$a = \frac{v^2}{26\,s} = \frac{v}{3{,}6\,t} = \frac{2s}{t^2}$
Время ускорения или замедления в с	$t = \frac{v}{a} = \frac{2s}{v} = \sqrt{\frac{2s}{a}}$	$t = \frac{v}{3{,}6\,a} = \frac{7{,}2\,s}{v} = \sqrt{\frac{2s}{a}}$
Путь ускорения или замедления в м	$s = \frac{v^2}{2a} = \frac{v\,t}{2} = \frac{a\,t^2}{2}$	$s = \frac{v^2}{26\,a} = \frac{v\,t}{7{,}2} = \frac{a\,t^2}{2}$

Таблица 9. Ускорение и замедление

Параметр	Горизонтальная поверхность дороги	Дорога с углом продольного уклона α [°]; p = 100 tan α [%]	
Предельное ускорение или замедление a_{max} в м/с²	$a_{max} = k\,g\,\mu_r$	$a_{max} = g\,(k\,\mu_r \cos\alpha \pm \sin\alpha)$ приблизительная формула [1]: $a_{max} = g\,(k\,\mu_r \pm 0{,}01\,p)$	+ Торможение на подъеме или ускорение на уклоне – Ускорение на подъеме или торможение на подъеме

Таблица 10. Достижимое ускорение $a_в$ (P_a в кВт, v в км/ч, m в кг)

Горизонтальная дорога	Дорога с продольным уклоном	
$a_в = \frac{3\,600\,P_a}{k\,m\,v}$	$a_в = \frac{3\,600\,P_a}{k\,m\,v} \pm g\sin\alpha$	+ Ускорение на уклоне – Ускорение на подъеме при $g\sin\alpha$ приблизительно [1] $g\,p/100$

Таблица 11. Работа и мощность

Параметр	Горизонтальная поверхность дороги	Дорога с углом продольного уклона α [°]; p = 100 tan α [%]	
Ускорение или Работа тормозных сил W в Дж [2]	$W = k\,m\,a\,s$	$W = m\,s\,(k\,a \pm g\,\sin\alpha)$ аппроксимация [1]: $W = m\,s\,(k\,a \pm g\,p/100)$	+ Торможение на уклоне или ускорение на подъеме – Ускорение на уклоне или торможение на подъеме
Ускорение или работа тормозных сил W при скорости v	$P_a = k\,m\,a\,s\,v$	$P_a = m\,v\,(k\,a \pm g\,\sin\alpha)$ Приблизительная формула [1]: $P_a = m\,v\,(k\,a \pm g\,p/100)$	v в м/с. Для v в км/ч использовать v/3,6.

[1] Действительно для p прибл. 20% (при погрешности 2%); [2] 1 Дж = 1 Н · м = 1 Вт · с.

Ускорение и торможение

Автомобиль может ускоряться (разгоняться) или замедляться (затормаживаться) с постоянной интенсивностью, когда величина α остается неизменной. Для условий, когда начальная или конечная скорость равны нулю, используются уравнения, приведенные в табл. 8.

Максимально допустимые ускорения и замедления

Когда тяговые или тормозные силы на колесах автомобиля не превышают силы сцепления шины с дорогой (сцепление еще существует), зависимости между углом продольного уклона дороги α коэффициентом сцепления μ. и максимальным ускорением или замедлением имеют вид приведенный в табл. 9 и 10. Реальные значения рассматриваемых параметров всегда оказываются меньше, так как не все шины автомобиля одновременно обеспечивают максимальное сцепление с дорогой при каждом ускорении (замедлении). Электронные системы ABS,TCS, ESP обеспечивают поддержание величины тягового усилия вблизи максимального коэффициента сцепления.

При расчетах ускорения и замедления применяется коэффициент k – отношение нагрузки, приходящейся на ведущие или затормаживаемые колеса, к общей массе автомобиля. Когда на все колеса действует сила тяги или тормозная сила, $k = 1$ При распределении нагрузки 50% $k = 0,5$.

Например,
$k = 0,5$; $g = 10$ м/с²;
$\mu_r = 0,6$; $p = 15$ %;
$a_{max} = 10 \cdot (0,5 \cdot 0.6 \pm 0,15)$ м/с
При торможении автомобиля на подъеме (+):
$a_{max} = 4,5$ м/с²,
при торможении на уклоне (–):
$a_{max} = 1,5$ м/с².

Работа и мощность

Мощность, требуемая для получения заданного ускорения (замедления), изменяется в соответствии с изменением скорости движения автомобиля (см. табл. 11). Мощность, необходимая для движения с ускорением, равна:

$$P_a = P\,\eta - P_W, \text{ где}$$

P – выходная мощность двигателя
η – к.п.д.
P_W – мощность, расходуемая на движение.

Действия: реакции, торможение и остановка автомобиля

(в соответствии с ONORM V 5050 [1] и [2])

Время распознавания опасности

Время распознавания опасности, также известное как время реакции на опасность, это период времени между восприятием водителем видимого препятствия или его движения и моментом его определения как опасности (рис. 6). Если в процессе этого распознавания опасности и соответствующей реакции водителю требуется направить взгляд в сторону опасной ситуации, время распознавания опасности и время реакции на опасность увеличивается приблизительно на 0,4 с.

Время, предшествующее торможению

Время, предшествующее торможению (t_{VZ}), – это период времени между моментом распознавания опасности и началом торможения, определяемый посредством вычислений. В соответствии со следующей формулой время, предшествующее торможению, составляет приблизительно от 0,8 до 1,0 с:

$$t_{VZ} = t_R + t_U + t_A + t_S/2\,.$$

Время реакции (t_R) – это период времени между моментом возникновения определенного побуждения к действию и началом первого, специально направленного действия. Инстинктивное распознавание опасности вызывает автоматическую (спонтанную) реакцию, позволяющую водителю автомобиля определить как цель реакции, так и повод для реакции, с задержкой на расстояние, пройденное автомобилем за время, предшествующее торможению. Для спонтанной реакции человеку требуется около 0,2 с; однако, если водителю необходимо принять решение о выполнении того или иного превентивного действия или маневра уклонения, как реакции на сознательное распознавание опасности, время реакции будет составлять как минимум 0,3 с (время выбора).

Время переноса (t_U) – это период времени, требующийся водителю, чтобы перенести ногу с педали акселератора на педаль тормоза. Время переноса составляет около 0,2 с.

Время отклика (t_A) – это период времени, требуемый для передачи давления, прилагаемого к педали тормоза, через тормозную систему, до момента, когда

торможение становится эффективным (момента полного накопления давления и начала замедления автомобиля).

Время накопления давления (t_S) – это период времени между началом торможения и моментом достижения полностью эффективного тормозного замедления. В качестве альтернативы время начала торможения можно принять равным половине времени накопления давления ($t_S/2$)

В соответствии с Директивой Совета Министров стран ЕС EEC 71/320, Приложение 3/2.4, сумма времени отклика и накопления давления не должна превышать 0,6 с. Плохое обслуживание тормозной системы приводит к увеличению времени отклика и накопления давления.

Время торможения

Время торможения(t_B) – это период времени между математически вычисленным моментом начала торможения и моментом полной остановки автомобиля. Этот период времени включает половину времени накопления давления ($t_S/2$) (предполагается: берется только половина времени накопления давления, но имеет место полное тормозное замедление), а также время полного торможения (t_V), в течение которого имеет место фактическое максимальное замедление.

Рис. 6. Действия: реакция, торможение и остановка:
a – замедление во время торможения;
b – расстояние, пройденное за время торможения

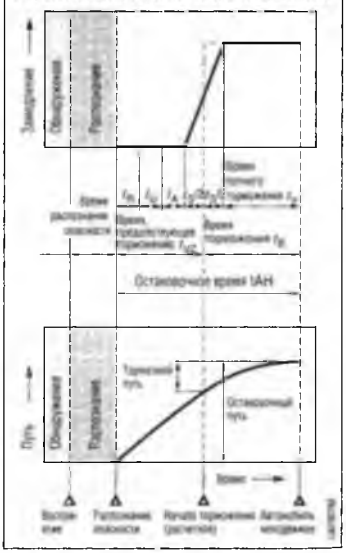


Таблица 12. Остановочный путь и остановочное время

Параметр	Уравнения для v в м/с	Уравнения для v в км/ч
Остановочное время $t_{АН}$ в с	$t_{АН} = t_{VZ} + \frac{v}{a}$	$t_{АН} = t_{VZ} + \frac{v}{3,6\,a}$
Остановочный путь $s_{АН}$ в м	$s_{АН} = v\,t_{VZ} + \frac{v^2}{2\,a}$	$s_{АН} = \frac{v}{3,6}\,t_{VZ} + \frac{v^2}{25,92\,a}$

Таблица 13. Остановочный путь в функции скорости движения и замедления

Замедление a в м/с²	Скорость движения автомобиля до начала торможения, км/ч												
	10	30	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
	Расстояние, проходимое автомобилем за 1 с (без торможения), м												
	2,8	8,3	14	17	19	22	25	28	33	39	44	50	56
	Остановочный путь, м												
4,4	3,7	16	36	48	62	78	96	115	160	210	270	335	405
5	3,5	15	33	44	57	71	87	105	145	190	240	300	365
5,8	3,4	14	30	40	52	65	79	94	130	170	215	265	320
7	3,3	13	28	36	46	57	70	83	110	145	185	230	275
8	3,3	13	26	34	43	53	64	76	105	135	170	205	250
9	3,2	12	25	32	40	50	60	71	95	125	155	190	225

$t_B = t_S/2 + t_V$

Остановочный путь и остановочное время
Остановочное время (t_{AH}) представляет собой сумму времени, предшествующего торможению (t_{VZ}), и времени торможения (t_B):

$t_{AH} = t_{VZ} + t_B$.

Остановочный путь (s_{AH}) можно вычислить путем интегрирования (см. табл. 12 и 13).

Обгон

Весь маневр обгона включает в себя такие стадии, как выезд обгоняющего автомобиля с полосы своего движения, опережение другого автомобиля и возвращение снова на свою полосу движения (см. рис. 7). Решение водителя о необходимости обгона принимается под действием ряда обстоятельств, точное определение которых затруднено. По этим причинам в приведенных графиках и иллюстрациях, а также уравнениях рассматриваются только два частных случая: обгон при постоянной скорости движения и обгон при постоянном ускорении. Можно упростить графики, если представить путь обгона s_u как сумму двух составляющих s_H и s_L, а также не учитывать дополнительный путь, который проходит обгоняющий автомобиль при выезде со своей полосы движения и въезде на нее снова.

Таблица 14. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
a	Ускорение	м/с²
l_1, l_2	Длина автомобиля	м
s_1, s_2	Дистанция безопасности	м
s_H	Относительное расстояние, пройденное обгоняющим автомобилем	м
s_L	Путь, пройденный обгоняемым автомобилем за время маневра обгона	м
s_u	Путь обгона	м
t_u	Время обгона	с
v_L	Скорость медленного автомобиля	км/ч
v_H	Скорость быстрого автомобиля	км/ч

Путь обгона
Путь обгона равен:

$s_u = s_H + s_L$ (см. переменные, приведенные в табл. 14).

Путь s_H, который обгоняющий автомобиль должен пройти относительно обгоняемого (он считается неподвижным), можно выразить через сумму габаритной длины l_1 и l_2 обоих автомобилей и дистанций безопасности s_1 и s_2.

$s_H = s_1 + s_2 + l_1 + l_2$.

В течение времени обгона t_u обгоняемый автомобиль проходит расстояние s_L – это расстояние, которое должен пройти обгоняющий автомобиль для обеспечения дистанции безопасности.

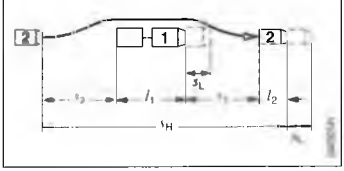
$s_L = t_u\, v_L/3{,}6$ (где v в км/ч).

Дистанция безопасности
Минимальная дистанция безопасности соответствует расстоянию, проходимому в течение времени, предшествующего торможению t_{VZ}. Величина дистанции безопасности при времени, предшествующему торможению t_{VZ} = 1,08 с при скорости в км/ч составляет (0,3 v) метров. Однако за пределами зон застройки рекомендуется принимать ее равной как минимум 0,5 v.

Обгон с постоянной скоростью
На автомагистралях с более чем двумя полосами движения обгоняющий автомобиль может выполнять обгон, не изменяя скорости движения. При этом время обгона (от момента изменения первоначальной полосы движения до момента возвращения на эту же полосу) будет равно:

$$t_U = \frac{3{,}6\, s_H}{v_H - v_L}$$

Рис. 7. Путь обгона:
1 – обгоняемый автомобиль;
2 – обгоняющий автомобиль
Величины приведены в табл. 14



где t в с, s в м и v в км/ч

Путь обгона:

$$s_U = \frac{t_U v_H}{3,6} \approx \frac{s_H v_H}{v_H - v_L}.$$

Обгон при постоянном ускорении

На узкой дороге скорость обычно снижается до скорости идущего впереди легкового или грузового автомобиля, а затем производится необходимый для обгона разгон. Величина ускорения зависит от мощности двигателя, массы автомобиля, скорости движения и сопротивления движению; значение ускорения обычно лежит в диапазоне 0,4 – 0,8 м/с² и поднимается до 1,4 м/с² при включении низших передач для повышения интенсивности разгона и соответствующего уменьшения времени обгона. Путь, необходимый для обгона, никогда не должен превышать половины видимого отрезка дороги.

Если допустить, что постоянное ускорение может поддерживаться в течение всего маневра, то время обгона будет равно:

$$t_U = \sqrt{2\, s_H/a}.$$

Расстояние, которое обгоняемый автомобиль проходит в течение этого периода, определяется как

$s_L = t_U v_L/3,6$. Тогда путь обгона:

$$s_U = s_H + t_U v_L/3,6$$

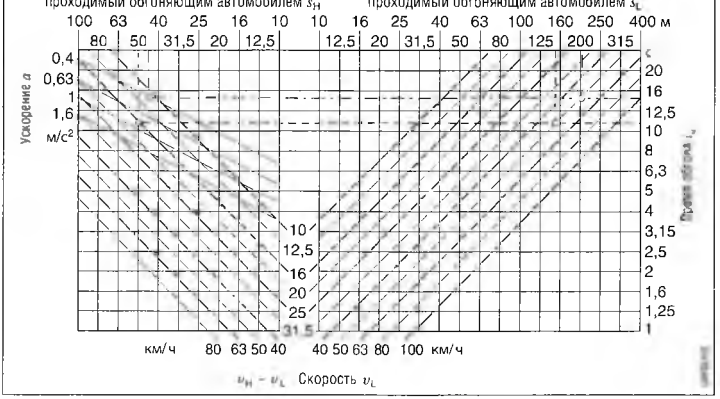
где t в с, s в м и v в км/ч.

В левой части рис. 8 показано относительное расстояние s_H для разностей скоростей $v_H - v_L$ и ускорений a, в то время как в правой части - расстояния s_L, проходимые обгоняемым автомобилем при различных скоростях v_L. Путь обгона s_u при этом равен сумме s_H и s_L.

Сначала определяется путь s_H, который должен пройти обгоняющий автомобиль. Вводим это расстояние в левой части диаграммы между осью Y и соответствующей линией $(v_H - v_L)$ или линией ускорения. Затем продолжаем эту линию вправо до линии скорости v_L.

Пример (представлен штрих-пунктирными линиями на графике определения пути обгона):
$v_L = v_H = 50$ км/ч,
$a = 0,4$ м/с²,
$l_1 = 10$ м, $l_2 = 5$ м,
$s_1 = s_2 = 0,3\, v_L = 0,3\, v_H = 15$ м.

Рис. 8. График определения пути обгона



Решение:
находим точку пересечения a = 0,4 м/с² и
s_H = 15 + 15 + 10 + 5 = 45 м
на левой стороне графика и определяем:
t_U = 5 с, s_L = 210 м,
отсюда $s_U = s_H + s_L$ = 255 м.

Визуальный диапазон

Для безопасного выполнения обгона на узкой дороге расстояние видимости должно быть равно, как минимум, сумме пути обгона и расстояния, которое проходит встречный автомобиль за время выполнения маневра. Это расстояние равно примерно 400 м, если обгоняющий и встречный автомобили движутся со скоростями 90 км/ч, а обгоняемый автомобиль – со скоростью 60 км/ч

Расход топлива

Определение расхода топлива

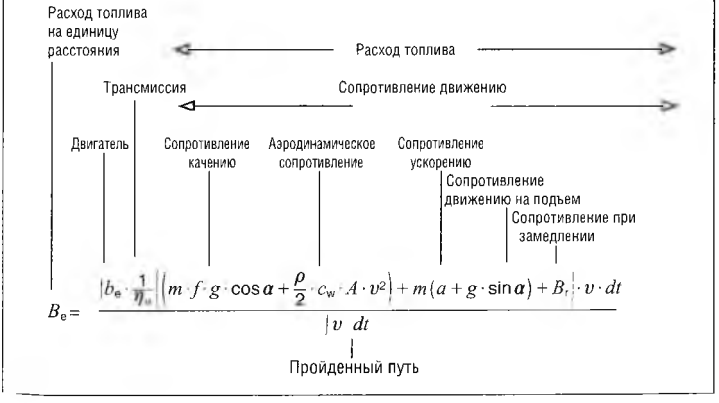
Официальные данные для стандартного расхода топлива получены в ходе динамометрических испытаний, проводимых на специальных стендах для определения количества выбросов, на которых выполняются предписанные нормами испытательные циклы (например, MNEDC для Европы, FTP 75 и Highway для США и JC08 для Японии). Отработавшие газы собираются в специальные мешки для сбора образцов, и затем, для определения расхода топлива, определяется содержание в них таких составляющих, как HC, CO и CO_2 (см. «Техника измерения содержания выбросов в отработавших газах»). Содержание CO_2 в отработавших газах пропорционально расходу топлива.

Для Европы действительны следующие справочные значения:
Дизельное топливо: 1 *l*/100 км ≈ 26,5 г CO_2/км.
Бензин (Евро-4): 1 *l*/100 км ≈ 24,0 г CO_2/км.
Бензин (Евро-5): 1 *l*/100 км ≈ 23,4 г CO_2/км.

Таблица 15. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
B_e	Расход топлива на единицу расстояния	г/м
b_e	Удельный расход топлива	г/кВт*ч
m	Масса автомобиля	кг
A	Площадь лобовой поверхности автомобиля	м²
f	Коэффициент сопротивления качению	–
c_W	Коэффициент аэродинамического сопротивления	–
g	Ускорение силы тяжести	м/с²
t	Время	с
v	Скорость движения	м/с
a	Ускорение	м/с²
B_r	Сопротивление при торможении	Н
η_U	К.п.д. кинематической цепи привода	–
ρ	Плотность воздуха	кг/м³
α	Угол уклона	°

Рис. 9. Влияние конструкции автомобиля на расход топлива
Величины приведены в табл. 15



Переход со стандарта Евро-4 на Евро-5 связан с добавлением к бензину 5 % этилового спирта.

Масса автомобилей моделируются на испытательных стендах, как контрольная масса, которая, в зависимости от страны и собственной массы автомобиля, распределяется по категориям с инкрементами 55–120 кг. При отнесении автомобиля к тому или иному классу массы имеется в виду масса автомобиля в снаряженном состоянии (включая все эксплуатационные жидкости и заполненный на 90 % топливный бак), а также дополнительные 100 кг в качестве эквивалента массы водителя и багажа. Разница в расходе топлива между двумя соседними классами массы, в зависимости от типа автомобиля, составляет от 0,15 до 0,25 л/100 км.

Единицы расхода топлива

Стандартный расход топлива, в зависимости от страны и цикла испытаний, выражается в различных единицах. В Европе этот параметр выражается в г CO_2/км или л/100 км, в США – в mpg (милях на галлон), а в Японии – в км/л.

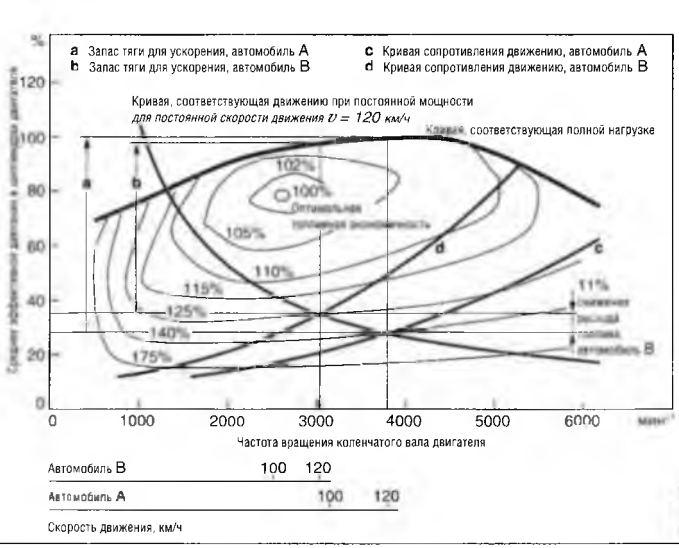
Примеры перевода:
30 mpg → 235,215/30 → 7,8 л/100 км,
22,2 км/л → 100/22,2 → 4,5 л/100 км.

Сопротивление движению

Если пренебречь влиянием, которое оказывает на расход топлива стиль вождения (которое может достигать 30 %), можно выделить три группы факторов, оказывающих влияние на расход топлива (см. рис. 9):

- двигатель (включая ременные передачи и принадлежности);
- внутреннее сопротивление движению со стороны кинематической цепи привода (например, трансмиссии и дифференциалов);
- внешнее сопротивление движению.

Рис. 10. Диаграмма расхода топлива двигателем



Внешнее сопротивление движению
Внешнее сопротивление движению определяет минимальную энергию автомобиля, требуемую при том или ином режиме движения. Внешнее сопротивление движению автомобиля может быть уменьшено путем снижения массы автомобиля, улучшения его аэродинамики и внедрения мер по уменьшению сопротивления качению. В среднем уменьшение на 10 % массы автомобиля, аэродинамического сопротивления и сопротивления качению приводит к снижению расхода топлива примерно на 6, 3 и 2 %, соответственно.

Формула, приведенная на рис. 9, проводит различие между сопротивлением разгону и сопротивлением замедлению. Она ясно показывает, что расход топлива на единицу расстояния возрастает, прежде всего, при частом использовании тормозов и отсутствии системы отсечки подачи топлива, даже при наличии гибридной системы, используемой для рекуперации некоторой части энергии торможения.

Внутреннее сопротивление движению
Внутреннее сопротивление движению включает потери в кинематической цепи привода, от коленчатого вала до колес. На рис. 10 суммы внутреннего и внешнего сопротивлений движению представлены кривыми c и d, где автомобиль А демонстрирует значительно более низкое сопротивление движению, чем автомобиль В.

Так же как потери мощности в цепи привода, на расход топлива оказывает влияние общее передаточное отношение. Оно вычисляется как произведение передаточных отношений трансмиссии и дифференциала. Выбор общего передаточного отношения определяет различные рабочие точки на диаграмме расхода топлива для данной скорости движения. Более «длинное» передаточное отношение, т.е. меньшее общее передаточное отношение в общем случае сдвигает рабочую точку в область более низкого расхода топлива. В то же время следует отметить, что это приводит к ухудшению характеристик разгона автомобиля и характеристики NVH («Шум – Вибрация – Резкость»), оказывающего влияние на уровень комфорта водителя. Отсюда следует, что разумный выбор передаточного отношения возможен только в определенных пределах.

Самым распространенным способом представления диаграмм расхода топлива является«график», на котором среднее эффективное давление и, как семейство параметров, линии постоянного удельного расхода топлива (расход топлива, отнесенный к выходной мощности, в г/кВт·ч), строятся в зависимости от величины оборотов двигателя (см. рис. 10). Это дает возможность сравнить эффективность двигателей различных размеров и типов.

Другим способом представления является установление как семейства параметров, расхода топлива или массового расхода (например, в кг/ч). Эта форма представления особенно удобна в качестве входной переменной для программ автоматизированного конструирования (CAE), которые могут быть использованы для моделирования расхода топлива (исходя из количества выбросов CO_2).

В обоих представлениях в качестве дополнительной информации вводятся кривая крутящего момента при полной нагрузке, в качестве верхней ограничительной линии, обороты холостого хода и предельно допустимые обороты, как ограничивающие частоты вращения, а также линии постоянной мощности (гиперболы мощности в соответствии с равенством $P \sim p_{me} \cdot n$).

Динамика поперечного перемещения

Диапазоны бокового ускорения

На современных легковых автомобилях боковое ускорение может достигать 10 м/с^2. Величина бокового ускорения разделяется на следующие диапазоны (рис. 1):

Диапазон от 0 до 0,5 м/с^2 известен под названием диапазона малого сигнала. В этом диапазоне явление возникает при прямолинейном движении под действием таких возмущений, как неровности дороги и боковой ветер. Ветровые возмущения возникают вследствие порывов ветра и при въезде в закрытые от ветра зоны и выезде из них.

Диапазон от 0,5 до 4 м/с^2 известен под названием линейного диапазона, поскольку поведение автомобиля в этом диапазоне может быть описано при помощи линейной, однолейной модели. К типичным маневрам, связанным с динамикой поперечного движения, относятся резкое манипулирование рулем, перестроение из ряда в ряд, а также комбинации маневров, связанных с изменением динамики как продольного, так и поперечного движения, например, вследствие реакций на изменения нагрузки при прохождении поворотов.

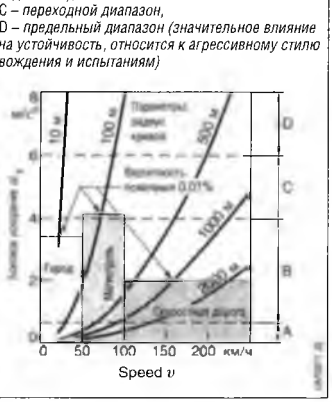
В диапазоне бокового ускорения от 4 до 6 м/с^2, в зависимости от конструктивных особенностей автомобиля, его поведение в отношении бокового ускорения может оставаться линейным или становиться нелинейным. Поэтому этот диапазон рассматривается как переходной. В этом диапазоне автомобили с максимальным боковым ускорением от 6 до 7 м/с^2 (например, внедорожные автомобили) уже демонстрируют нелинейные характеристики, в то время как автомобили, достигающие более высоких уровней бокового ускорения (например, спортивные автомобили) продолжают показывать линейные характеристики.

Боковое ускорение свыше 6 м/с^2 достигается только в экстремальных ситуациях, поэтому рассматривается как предельный диапазон. В этом диапазоне характеристики автомобиля в основном нелинейны и оказывают влияние на устойчивость автомобиля. Этот диапазон достигается на спортивных трассах или в ситуациях, в условиях обычного дорожного движения приводящих к авариям.

Таблица 1. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
δ	Угол поворота оси	рад
δ_H	Угол поворота рулевого колеса	рад
α_v	Угол увода передней оси	рад
α_h	Угол увода задней оси	рад
β	Угол дрейфа	рад
ψ	Угол рыскания	рад
ω_e	Недемпфированная собственная частота	с$^{-1}$
l	Колесная база	м
l_v	Расстояние между передней осью и центром тяжести	м
l_h	Расстояние между задней осью и центром тяжести	м
v	Продольная скорость	м/с
v_f	Результирующая скорость воздействия ветра	м/с
C_v	Жесткость в повороте передней оси	Н/рад
C_h	Жесткость в повороте задней оси	Н/рад
D	Коэффициент демпфирования	1/рад
m	Полная масса	кг
i_l	Передаточное отношение рулевого механизма	–
F_{SV}	Поперечная сила, действующая на переднюю ось	Н
F_{SH}	Поперечная сила, действующая на заднюю ось	Н
a_y	Боковое ускорение	м/с^2
Θ	Момент инерции рыскания	Н*мс^2
ρ	Плотность воздуха	кг/м^3
a	Площадь лобовой поверхности автомобиля	м^2
τ	Угол воздействия	рад
F_S	Сила бокового ветра	Н
M_Z	Момент рыскания под действием бокового ветра	Нм

Рис. 1. Диапазоны бокового ускорения:
A – диапазон малого сигнала;
B – линейный диапазон (относится к обычным водителям),
C – переходной диапазон,
D – предельный диапазон (значительное влияние на устойчивость, относится к агрессивному стилю вождения и испытаниям)



Для среднего водителя боковое ускорение обычно составляет до 4 м/с^2. Это означает, что при субъективной оценке ситуации водитель управляет автомобилем таким образом, что боковое ускорение находится в диапазоне малого сигнала или в границах линейного диапазона (рис. 1). Для среднего водителя вероятность возникновения бокового ускорения экспоненциально снижается с падением скорости.

Одноколейная линейная модель

Из одноколейной линейной модели могут быть получены важные выводы, касающиеся динамических характеристик поперечного движения. В одноколейной линейной модели динамические свойства одной оси и ее колес сведены в одно эффективное колесо. В простейшем варианте, как показано здесь, рассматриваемые характеристики находятся в линейном диапазоне, что объясняет, почему модель этого типа называется одноколейной линейной моделью. Наиболее важными модельными предположениями являются следующие:

- кинематика и эластокинематика оси моделируются только линейно;
- поперечная сила, действующая на шину, возрастает линейно, а стабилизирующий крутящий момент игнорируется;
- предполагается, что центр тяжести автомобиля находится на уровне дороги. Следовательно, единственной вращательной степенью свободы автомобиля является движение рыскания. Крен, продольная качка и подскоки на неровностях не учитываются.

Способность автомобиля к восстановлению прямолинейного движения

На рис. 2 представлена однолинейная модель для условий быстрого и медленного заноса. Результатом этого представления являются следующие соотношения, описывающие кинематику углов скольжения [3, 4, 5]:

$$\alpha_v = \delta - \beta - \frac{\psi \cdot l_v}{v} \; ; \quad \alpha_h = -\beta - \frac{\psi \cdot l_h}{v} \; .$$

Вместе с балансом моментов можно вычислить изменение угла поворота рулевого колеса, связанное с увеличением бокового ускорения, в условиях маневра с заносом при постоянном радиусе. Это дает определение градиента самовыравнивания управляемых колес EG:

$$EG = \frac{d\delta}{da_y} = \frac{m}{l}\left(\frac{l_v}{C_v} - \frac{l_h}{C_h}\right).$$

Конструкция всех легковых автомобилей в линейном диапазоне бокового ускорения предусматривает недостаточную поворачиваемость. Значение EG для легковых автомобилей составляет около 0,25 градус · с^2/м.

В отношении динамики бокового движения градиент самовыравнивания управляемых колес

Рис. 2. Одноколейная модель заноса в установившемся состоянии:
β – угол дрейфа; γ – скорость рыскания;
β_0 – угол дрейфа при качении колеса без скольжения;
δ_h – Угол Аккермана; δ – угол поворота колеса;
α_v – угол увода переднего колеса; α_h – угол увода заднего колеса;
v_v – скорость шины передней оси;
v_h – скорость шины задней оси;
l – колесная база F_{hl} – центробежная сила
F_{Sv} – поперечная сила; действующая на переднюю ось,
F_{Sh} – поперечная сила; действующая на заднюю ось;
MP – полюс момента; SP – центр тяжести;
R – расстояние между центром тяжести и полюсом момента,
R_v – расстояние между передней осью и полюсом момента,
R_h – расстояние между задней осью и полюсом момента



Быстрый занос: колеса катятся с боковым скольжением, → это приводит к возникновению углов увода и, следовательно, поперечных сил

Медленный занос: колеса катятся без бокового скольжения, → углы увода и поперечные силы отсутствуют

характеризует устойчивость и демпфирование автомобиля. Кроме того, значение градиента самовыравнивания для среднего водителя становится очевидным, поскольку угол поворота колес увеличивается с ростом скорости прохождения поворота. Это привлекает внимание водителя к возрастающему боковому ускорению.

Градиент угла дрейфа (SG) можно вычислить, воспользовавшись схемой, представленной на рис. 2. В целях повышения устойчивости автомобиля градиент угла дрейфа должен быть как можно меньше [3, 4, 5].

$$SG = \frac{d\beta}{da_y} = \frac{m}{C_h} \frac{l_v}{l}.$$

Коэффициент усиления рыскания

Коэффициент усиления рыскания определяет степень рыскания автомобиля в ответ на изменение угла поворота рулевого колеса в квазиустойчивом состоянии. Коэффициент усиления рыскания можно определить, выполнив следующее испытание: при движении с постоянной скоростью рулевое колесо поворачивается из стороны в сторону с частотой менее 0,2 Гц. Амплитуда угла поворота рулевого колеса выбирается таким образом, чтобы максимальное боковое ускорение составило около 3 м/с^2. Начиная со скорости 20 км/ч, маневр повторяется с увеличением скорости каждый раз на 10 км/ч. При условии отсутствия аэродинамических воздействий на высоких скоростях (подъемных сил, воздействующих на переднюю и заднюю оси), результаты испытания дают кривые коэффициента усиления рыскания, в основном согласующиеся со следующим уравнением, выведенным из одноколейной линейной модели [3, 4, 5]:

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta}\right)_{stat} = \frac{v}{l + EG\ v^2}.$$

На рис. 3 показан коэффициент усиления рыскания для автомобиля, имеющего тенденцию к избыточной поворачиваемости ($EG<0$), нейтральную управляемость ($EG=0$) и тенденцию к недостаточной поворачиваемости ($EG>0$). При высоких скоростях движения приемлемой является только недостаточная поворачиваемость, обеспечивающая требуемую динамику автомобиля даже во время движения по прямой. Скорость, при которой автомобиль, имеющий тенденцию к недостаточной поворачиваемости, демонстрирует максимальную реакцию рыскания, известна как характеристическая скорость v_{char}. В линейной одноколейной модели эта скорость выражается как:

$$v_{char} = \sqrt{\frac{l}{EG}}$$

Коэффициент демпфирования

Из линейной одноколейной модели выведено следующее уравнение равновесия сил:

$$m\,a_y = F_{sv} \cos\delta - F_{sh}.$$

Для баланса моментов:

$$\theta\,\ddot{\psi} = F_{sv}\,l_v \cos\delta + F_{sh}\,l_h.$$

Коэффициент демпфирования D возмущения в отношении динамики поперечного движения может быть выведен из двух следующих уравнений:

Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления рыскания от скорости

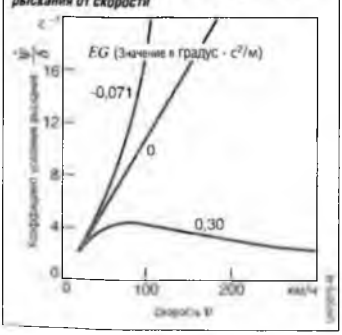
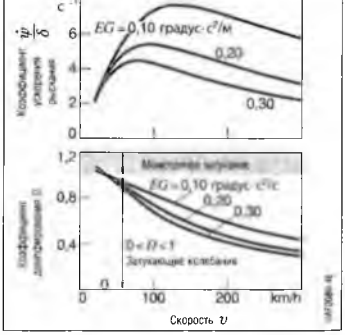


Рис. 4. Коэффициент демпфирования и коэффициент усиления рыскания



$$D = \frac{1}{\omega_n} \left(\frac{C_v + C_h}{m\ v} + \frac{C_v\ l_v^2 + C_h\ l_h^2}{\theta\ v} \right)$$

Недемпфированная собственная частота выражается следующим уравнением:

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{C_h\ l_h}{\theta} - \frac{C_v\ l_v}{m\ v^2} + \frac{C_v\ C_h\ l^2}{\theta\ m\ v^2} \right)}$$

Коэффициент демпфирования автомобиля может быть определен, например, из реакции рыскания на резкий поворот рулевого колеса или иное ступенчатое входное воздействие. При разработке конструкции автомобиля разработчики стремятся получить как можно более высокий коэффициент демпфирования.

На рис. 4 показаны коэффициенты демпфирования и усиления рыскания для различных градиентов самовыравнивания. При этом имеет место следующий конфликт целей:

- если автомобиль должен обладать хорошими характеристиками прямолинейного движения, требуется высокое значение градиента самовыравнивания;
- для обеспечения высокого коэффициента демпфирования, особенно на высоких скоростях, градиент самовыравнивания должен быть как можно более низким.

Диаграмма боковой подвижности

Еще одной важной переменной, определяющей сбалансированность автомобиля, является общее передаточное отношение рулевого механизма i_l. Угол поворота рулевого колеса δ_H вычисляется, исходя из угла поворота оси, как:

$$\delta_H = i_l\ \delta .$$

Это дает следующее уравнение для максимального коэффициента усиления рыскания:

$$\left(\frac{\psi}{\delta_H} \right)_{max} = \frac{1}{2\ i_l \sqrt{l\ EG}} .$$

Этот максимум построен на диаграмме боковой подвижности (рис. 5) в функции передаточного отношения рулевого механизма. Дополнительно на диаграмме показаны изолинии EG. Вдоль этих кривых градиент самовыравнивания постоянен. На этой диаграмме могут быть построены желаемые диапазоны коэффициента усиления рыскания и передаточного отношения рулевого механизма с целью определения необходимых градиентов самовыравнивания.

Если в автомобиле изменяется только передаточное отношение рулевого механизма, максимальный коэффициент усиления рыскания можно определить при помощи диаграммы боковой подвижности, сдвигая базовую линию вдоль изолиний EG. Если имеет место изменение характеристик оси, сдвиг осуществляется вдоль вертикальной оси.

Динамика поперечного движения

Ветер может вызывать динамические эффекты в боковом направлении. Реакция автомобиля на эти внешние воздействия проявляется в виде отклонения от желаемой траектории движения, бокового ускорения и изменения углов рыскания и крена. Чтобы противодействовать этим изменениям, водитель пытается выполнить корректирующие действия. Следовательно, необходимо учитывать скорость реакции водителя, а также способность автомобиля к коррекции. Согласно результатам исследования, непосредственная реакция автомобиля на боковой ветер является основной переменной величиной для субъективной оценки общей устойчивости автомобиль под действием бокового ветра. Это дает преимущество, заключающееся в том, что реакцию автомобиля на боковой ветер можно эффективно оценить посредством анализа.

Характеристически средний водитель воспринимает два состояния, вызываемые возмущениями в виде бокового ветра:

- естественный ветер, направление и скорость которого могут изменяться во время движения;
- въезд и выезд из областей «ветровой тени», когда на автомобиль могут воздействовать силы, значительно изменяющиеся по величине.

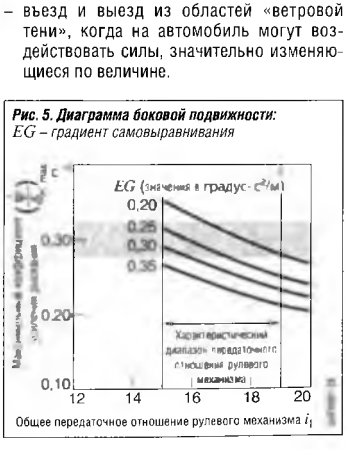


Рис. 5. Диаграмма боковой подвижности:
EG – градиент самовыравнивания

В автомобилестроении стремятся свести к минимуму эффекты возмущений, вызываемых ветровыми нагрузками, учитывая следующие факторы:
- «жесткость в повороте» шин, т.е. степень изменения поперечной силы при увеличении угла увода. При этом считается, что нагрузка на колесо остается постоянной;
- общая масса автомобиля;
- положение центра тяжести;
- характеристики оси;
- симметричность и упругость подвески;
- демпфирование;
- кинематика и эластокинематика осей;
- аэродинамическая форма и площадь лобовой поверхности автомобиля.

Аэродинамические силы и моменты

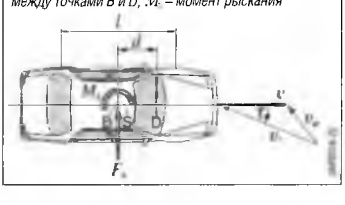
Когда автомобиль движется со скоростью v при ветре, имеющем скорость v_w, на него воздействует ветер с результирующей скоростью v_r. При наличии бокового ветра угол воздействия τ в общем случае отличен от 0 градусов, что приводит к возникновению поперечной силы F_S и момента рыскания M_Z, воздействующих на автомобиль.

В аэродинамике стандартной практикой является указание вместо сил и моментов безразмерных коэффициентов. Отсюда:

$$F_s = c_s \frac{\rho}{2} v_r^2 A; \; M_z = c_M \frac{\rho}{2} v_r^2 A l .$$

Момент M_Z и поперечная сила F_S, определенные в средней точке колесной базы, могут быть представлены единой поперечной силой F_S, когда точка приложения воздействия совпадает с точкой приложения давления D (рис. 6). Расстояние d между аэродинамической опорной точкой B и точкой приложения давления D вычисляется следующим образом:

Рис. 6. Автомобиль под действием бокового ветра: *D – точка приложения давления, S – центр тяжести, B – аэродинамическая опорная точка, v – скорость движения; v_w – скорость ветра; v_r – результирующая скорость, τ – угол воздействия; F_S – сила поперечного ветра; l – колесная база, d – расстояние между точками B и D; M_z – момент рыскания*



$$d = \frac{M_z}{F_s} = \frac{c_M \, l}{c_S} .$$

Чтобы в максимальной степени уменьшить влияние аэродинамических эффектов, следует принять меры к тому, чтобы точка приложения давления D находилась как можно ближе к центру тяжести автомобиля. Это существенно снизит эффективное влияние момента.

На рис. 7 представлены аэродинамические коэффициенты для двух наиболее типичных кузовов автомобиля, универсала и седана, в функции угла воздействия τ. Результирующее расстояние d для универсалов значительно меньше, чем для седанов (см. рис. 6). Для автомобилей с центром тяжести, расположенным посередине колесной базы, конструкция универсала, следовательно, менее чувствительна к боковому ветру, чем у седана.

Поведение в повороте

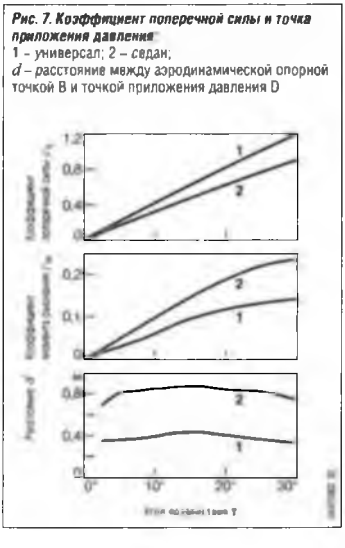
Центробежная сила, действующая в повороте (рис. 8):

$$F_{zf} = \frac{m}{l_h} v^2$$

Боковой крен кузова в повороте

При движении в повороте центробежная сила, приложенная в центре тяжести автомобиля,

Рис. 7. Коэффициент поперечной силы и точка приложения давления
1 – универсал; 2 – седан;
d – расстояние между аэродинамической опорной точкой B и точкой приложения давления D

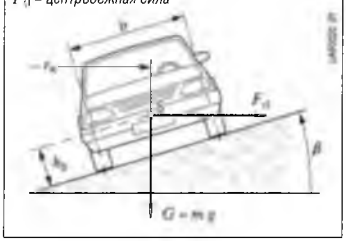


наклоняет кузов. Величина крена зависит от упругих характеристик подвески и ее восприимчивости к деформации, а также от плеча действия центробежной силы (расстояние между осью крена и центром тяжести автомобиля). Ось крена является одновременно мгновенной осью вращения кузова относительно поверхности дороги. Подобно всем жестким телам, кузов автомобиля подвергается совместному воздействию на него скручивающих и поворачивающих усилий, усугубляющих крен; это движение дополняется боковым смещением вдоль мгновенной оси.

Чем ближе расположена ось крена к центру тяжести автомобиля, тем выше его поперечная устойчивость и меньше крен при движении в повороте. Однако обычно это вызывает соответствующее перемещение вверх колес, что приводит к изменению колеи и оказывает негативное влияние на безопасность движения. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы высокое расположение мгновенного центра крена сочеталось с минимальными изменениями колеи автомобиля. Таким образом, целью конструкторов является расположение мгновенных осей наклонов колес как можно выше относительно кузова и одновременно как можно дальше от него.

Часто для нахождения (приблизительного) оси крена определяются центры вращения (центры крена) так называемого эквивалентного кузова. При этом рассматривают перемещение кузова в двух вертикальных относительно дороги плоскостях, проходящих через переднюю и заднюю оси автомобиля. Центры крена – это те гипотетические точки на кузове, которые остаются неподвижными при крене. Ось крена, в свою очередь, представляет собой линию, соединяющую эти точки. Графическое представление центров крена базируется на правиле, согласно которому мгновенные центры вращения трех систем в состоянии относительного движения лежат на одной линии.

Рис. 8. Действие центробежной силы в повороте: *b – ширина колеи, h_S – высота центра тяжести; $r_к$ – радиус поворота/кривой; β – угол наклона; G – вес автомобиля S – центр тяжести; $F_Ц$ – центробежная сила*



Сложность операций, требующихся для более точного определения пространственных соотношений, описывающих движение колеса, делает целесообразным использование трехмерной модели [3, 4, 5].

Список литературы

[1] ÖNORM V 5050: Straßenverkehrsunfall und Fahrzeugschaden; Terminologie.
[2] Fritz Sacher in Fucik, Hartl, Schlosser, Wielke (Editors): Handbuch des Verkehrsunfalls, Part 2, Manz-Verlag Vienna, 2008.
[3] Heissing, B., Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch, 2nd Edition, Vieweg + Teubner Verlag, 2008.
[4] Willumeit, H.-P.: Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik, Teubner-Verlag, 1998.
[5] Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge 4th Edition, Springer-Verlag 2004.

Таблица 1. Критические скорости при прохождении поворотов/кривых (соотношения для вычисления числовых значений)

	Горизонтальная кривая	Наклонная кривая
Скорость, при которой превышается предел сцепления колес с поверхностью дороги (возникновение заноса)	$v \le 11{,}28\sqrt{\mu_i\, r_к}$ км/ч	$v \le 11{,}28\sqrt{\frac{(\mu_i + \tan\gamma)\, r_к}{1 - \mu_i \tan\gamma}}$ км/ч
Скорость, при которой автомобиль опрокидывается	$v \ge 11{,}28\sqrt{\frac{b}{2}\frac{r_к}{h_S}}$ км/ч $\sqrt{\frac{b}{2}\frac{r_к}{h_S}}$ км/ч	$v > 11{,}28\sqrt{\frac{\left\lvert\frac{b}{2}\frac{1}{h_S} + \tan\gamma\right\rvert\, r_к}{1 - \frac{b}{2}\frac{1}{h_S}\tan\gamma}}$ км/ч

h_S – высота центра тяжести (в м); μ_i – максимальный коэффициент трения; b – ширина колеи (в м), $r_к$ – радиус поворота/кривой (м), γ – уклон поворота/кривой

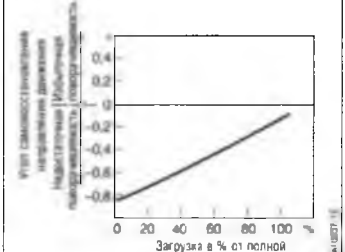
Специальные динамические характеристики грузовых автомобилей

Способность автомобиля к восстановлению прямолинейного движения

Целью является достижение не создающей проблем недостаточной поворачиваемости автомобиля. Поведение автомобиля в стационарных условиях движения определяется его способностью к восстановлению прямолинейного движения. В свою очередь эта способность определяется:

- механическими и гидравлическими параметрами рулевого механизма;
- жесткостью и геометрией рулевого механизма;
- эластокинематикой передней и задней осей;
- жесткостью рамы;
- стабилизацией крена передней и задней осей.

***Рис. 1.** Угол восстановления направления движения для грузового автомобиля массой 18 т - движение в повороте с поперечным ускорением 3 м/с²*



Внешние воздействия, такие как неровности дороги или боковой ветер, не должны оказывать значительного влияния на движение автомобиля. Эластокинематическая конструкция осей служит для сведения влияния этих внешних воздействий к минимуму. Целью является минимизация перемещений рулевого механизма под действием сжатия и обратного отскока элементов подвески, а также в результате торможения. Кинематические точки системы рулевого управления или точки присоединения рессор к раме в конфигурации эластокинематики действуют как установочные рычаги. Для конфигурирования эластокинематики используются геометрически нелинейные программы анализа методом конечных элементов. Конфигурация проверяется на специальных эластокинематических испытательных стендах.

Тяжелые грузовые автомобили с пневматической подвеской обычно имеют сплошные или неразрезные мосты. Конструкция таких мостов в общем случае обеспечивает практически неизменную способность к восстановлению прямолинейного движения при всех условиях загрузки автомобиля, поскольку различий в этом отношении между «ненагруженным» и «нагруженным» состояниями не существует. На сегодняшний день концепции управления мостами, подразумевающие независимый контроль колес, были реализованы только на легких автофургонах и автобусах.

Нагрузка на колеса задней оси значительно изменяется в зависимости от того, находится автомобиль в «ненагруженном» или «нагруженном» состоянии. При этом автомобиль реагирует на уменьшение нагрузки

***Рис. 2.** Многомодульная модель полноприводного автомобиля для определения способности автомобиля к восстановлению прямолинейного движения и моделирования его динамического поведения*



более явно выраженной недостаточной поворачиваемостью (см. рис. 1).

На трехосных автомобилях с колесной формулой 6 × 4 (шесть колес, четыре из которых ведущие) стабилизация прямолинейного движения двух неуправляемых осей задней тележки создает ограничивающий момент вокруг вертикальной оси автомобиля за счет разных углов увода первой и второй задних осей. Дополнительные направляющие усилия при повороте, требуемые для колес передней и задних осей при малых скоростях, определяются следующим образом (см. рис. 3).

Направляющие усилия при повороте с учетом ограничений для малых углов α:

$F_{S1} = F_{S2} - F_{S3}$, где

$F_{S2} = c_{p2} n_2 \alpha_2$,

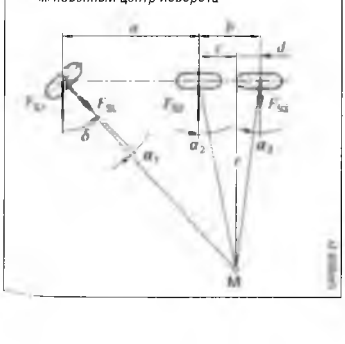
$F_{S3} = c_{p3} n_3 \alpha_3$.

Углы увода:

$$\alpha_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{c_{p3} n_3 b (a+b)}{c_{p3} n_3 (a+b) + c_{p2} n_2 a},$$

$$\alpha_3 = \frac{b}{r} - \alpha_2,$$

Рис. 3. Направляющее усилие при повороте F_S и угол увода α на трехосном автомобиле с неуправляемой сдвоенной задней тележкой:
a – расстояние от передней оси до первой задней оси,
b – расстояние от первой задней оси до второй задней оси;
c – расстояние от первой задней оси до мгновенного центра поворота;
d – расстояние от второй задней оси тележки до мгновенного центра поворота;
F_S – направляющие усилия при повороте, i = 1, 2, 3, L;
α_i – угол увода, i = 1, 2, 3;
δ – угол поворота оси; r – радиус кривой;
M – мгновенный центр поворота



где c_{p2} и c_{p3} – устойчивость к скольжению, определяемая свойствами шин; n_2 и n_3 – количество шин на одной оси. Прочие обозначения см. на рис. 3.

Сопротивление опрокидыванию

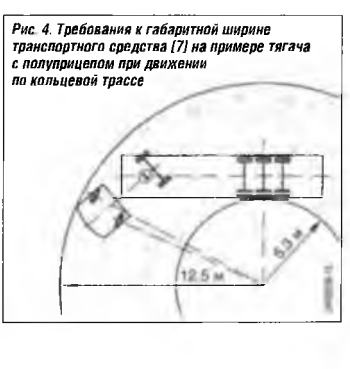
При увеличении габаритной высоты автомобиля появляется опасность его опрокидывания при повороте. Таким же образом, как параметры общего динамического поведения автомобиля, предельные параметры опрокидывания определяются при помощи многомодульной модели автомобиля (многомодульная система, см. рис. 2). В процессе моделирования исследуются различные стационарные и нестационарные маневры, такие как установившееся криволинейное движение ([1]) и двойное перестроение из ряда в ряд ([2]). Достижимое боковое ускорение b при пределе опрокидывания во время установившегося криволинейного движения составляет для легких автофургонов 6–8 м/с², для грузовых автомобилей 4–6 м/с² и для двухэтажных автобусов 3 м/с².

Все более широкое применение систем стабилизации курсовой устойчивости (ESP), определяющих величину и распределение нагрузки, также и на коммерческих автомобилях может значительно снизить риск опрокидывания.

Требования к габаритной ширине автомобиля

При движении автомобиля или автопоезда повороте габаритная ширина становится больше, чем при движении по прямой. Что касается выбора маневров при движении, необходимо определить радиус поворота автомобиля, приемлемый для заданных условий (например, узких улиц в плотно застроенных

Рис. 4. Требования к габаритной ширине транспортного средства [7] на примере тягача с полуприцепом при движении по кольцевой трассе



районах) и соответствующий принятым нормам безопасности (см. рис. 4). Это определяется при помощи многомодульной модели автомобиля.

Характеристики управляемости автомобиля

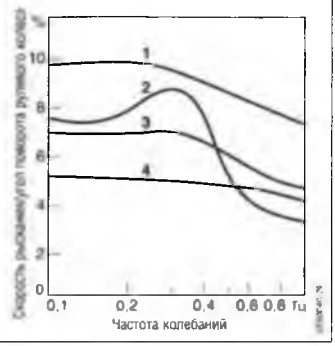
Объективный анализ поведения автомобиля осуществляется по результатам различных испытаний, таких как испытание в режиме установившегося криволинейного движения ([1]), «шаговое воздействие» ([3]), «испытание в колебательном режиме» ([4]), «одинарное и двойное перестроение» ([2]), «синусоидальное входное воздействие и частотный отклик» ([5]) и «торможение при прямолинейном движении и движении по кривой» ([6]).

Динамические боковые реакции комбинаций тягачей и прицепов (например, тягача с полуприцепом, грузового автомобиля с прицепом) в общем случае отличаются от реакций жестких автомобилей. Особенную важность представляет распределение нагрузок между тягачом и прицепом или полуприцепом, а также конструкция и геометрия тягово-сцепного устройства.

Причинами нарушения стабильности прямолинейного движения в виде рыскания автомобиля могут быть быстрые манипуляции рулем во время маневров уклонения, порывы бокового ветра, неровности дороги, препятствия с какой-либо одной стороны и поперечный уклон дороги. На устойчивых автомобилях рыскание, вызванное такими воздействиями, должно быстро затухать. Эти колебательные процессы можно оценить при помощи частотных характеристик рыскания (см. рис. 5). Частотные характеристики рыскания для различных комбинаций тягачей и прицепов демонстрируют, что в самом неблагоприятном случае (ненагруженный тягач с нагруженным прицепом с центральной осью, кривая 2 на рис. 5) имеет место возрастание тенденции к резонансу. Вождение такого автопоезда требует высокой квалификации и осмотрительности.

При торможении автопоездов в составе седельных тягачей в опасных ситуациях возможно их складывание. Этот процесс возникает на скользкой дороге (при низком значении коэффициента трения μ), когда из-за повышенного тормозного усилия, прикладываемого к задней оси тягача, уменьшается поперечная реакция или при чрезмерном увеличении момента μ, стремящегося развернуть автопоезд. Установка электронной системы динамической стабилизации (ESP) – это наиболее эффективный способ предотвращения складывания.

Рис. 5. Частотные характеристики рыскания: *1 – тягач с полуприцепом (нагружен), 2 – грузовой автомобиль с прицепом (не нагружен с нагруженным прицепом с центральной осью), 3 – грузовой автомобиль с прицепом (нагружены), 4 – грузовой автомобиль (нагружен)*



Список литературы

[1] ISO 14792 (2003): Road vehicles, Heavy commercial vehicles and buses; Steady-state circular tests.
[2] ISO 3881-1, ISO 3881-2 (2002): Passenger cars, test track for a severe lane change manoeuvre;
Часть 1: Double lane change,
Часть 2: Obstacle avoidance.
[3] ISO 14793 (2003): Road vehicles, Heavy commercial vehicles and buses; Lateral transient response test methods.
[4] ISO 11012 (2008): Heavy commercial vehicles and buses, Open-loop test methods for the quantification of on-centre handling; Weave-Test and Transition-Test.
[5] ISO 7401 (1988): Road vehicles; Lateral transient response test methods.
[6] ISO 14794 (2003): Heavy commercial vehicles and buses, Braking in a turn; Open-loop test method.
[7] Directive 2003/19/EC, BO-Kraftkreis (Turning Circle).

Методики динамических испытаний в соответствии со стандартами ISO

Обзор

При изучении поведения автомобиля, обычно исследуют систему «водитель – автомобиль – дорога» (см. рис. 2). Водитель оценивает управляемость автомобиля, исходя из собственных субъективных впечатлений. В конце 1970-х годов были разработаны международно стандартизованные методики испытаний. С одной стороны они имеют целью как можно более объективно и последовательно описать поведение автомобиля; с другой стороны они служат для определения характерных переменных величин, которые хорошо коррелируют в субъективными впечатлениями водителя. Кроме того, стандартизованные методики испытаний могут быть использованы для сравнения результатов испытаний с результатами моделирования при идентичных граничных условиях.

Большинство стандартизованных методик испытаний выполняется в режиме разомкнутого контура, т.е. при определенном ступенчатом входном воздействии со стороны рулевого управления без вмешательства водителя. При этом поведение автомобиля определяется без влияния стиля вождения различных водителей. Только некоторые методики выполняются в режиме замкнутого контура, т.е., когда входные воздействия осуществляются индивидуальным образом водителем.

Рис. 2. Комплексная система «водитель – автомобиль – дорога» как замкнутая система управления



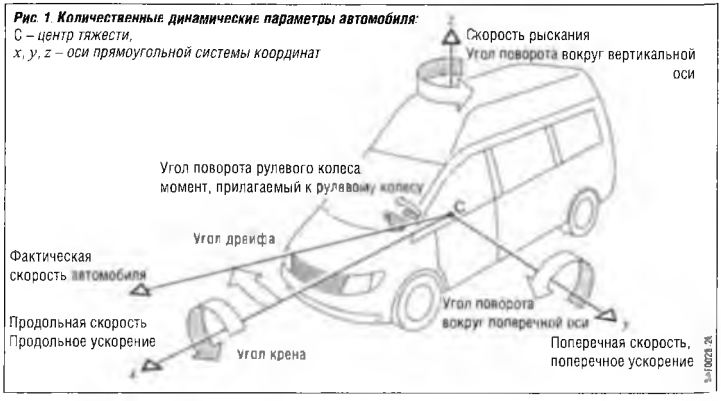
В настоящее время существует около 20 стандартов ISO на методики динамических испытаний, из которых здесь будут описаны следующие, наиболее часто используемые методики:

- установившееся криволинейное движение ([1], [2]);
- методики испытаний в переходном режиме ([3], [4]);
- испытания в режиме малых колебаний и в переходном режиме ([5], [6]);
- торможение на кривой/в повороте ([7], [8]).

Дополнительные методики испытаний, здесь не описываемые:

- двойное перестроение из ряда в ряд (в режиме замкнутого контура, [11]);

Рис. 1. Количественные динамические параметры автомобиля:
C – центр тяжести,
x, y, z – оси прямоугольной системы координат



- комбинации боковой устойчивости автомобиля ([12], [13]);
- устойчивость под действием бокового ветра ([14]);
- изменения нагрузки при прохождении поворотов ([15]).

Эти методики испытаний первоначально были разработаны для легковых автомобилей ([9], [10]). В дальнейшем на основе этих стандартов были созданы методы испытаний для тяжелых коммерческих автомобилей с их большой массой и инерцией с целью определения их уникальных характеристик поведения.

Общие граничные условия, которые должны быть в равной степени соблюдены для всех методик динамических испытаний, такие как, например, состояние дорожной поверхности, окружающие условия и состояние шин, определены в отдельном стандарте ISO ([16]), который дополнительно определяет требования к средствам измерения динамических параметров.

Количественные оценки

Для оценки поведения автомобиля в основном используются следующие измеряемые количественные параметры (рис. 1):

- угол поворота рулевого колеса и момент, прилагаемый к рулевому колесу;
- попоречное ускорение;
- скорость рыскания;
- угол крена;
- угол дрейфа.

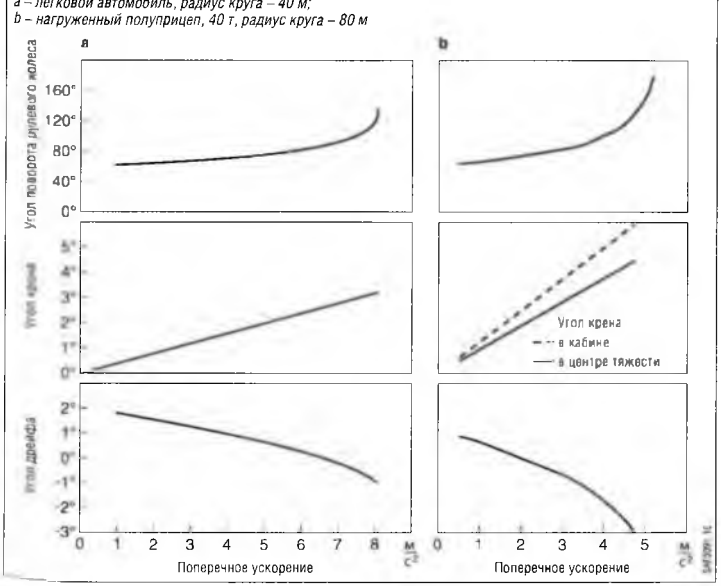
В зависимости от методики испытаний, из этих и иных количественных параметров определяются характеристические значения, служащие для описания и оценки поведения автомобиля. Эти измеряемые величины и характеристические значения определены в отдельном стандарте ISO ([17]).

Установившееся криволинейное движение

Методика

Методика испытаний «Установившееся криволинейное движение» ([1], [2]) обычно выполняется следующим образом: автомобиль

Рис. 3. Установившееся криволинейное движение:
a – легковой автомобиль, радиус круга – 40 м;
b – нагруженный полуприцеп, 40 т, радиус круга – 80 м



разгоняется на круговой трассе с постоянным радиусом (обычно для легковых автомобилей выбирается радиус 40 м, для грузовых автомобилей – 80 м), начиная с очень низкой стартовой скорости, и заканчивая максимально достижимым для данного автомобиля поперечным ускорением. Чтобы поведение автомобиля можно было считать установившимся, продольное ускорение не должно превышать (приблизительно) 1 м/с^2.

Оценка

Используемыми в основном критериями оценки являются данные угла поворота рулевого колеса, угла крена и угла дрейфа, построенные в зависимости от поперечного ускорения, которые показаны на рис. 3 для легкового автомобиля и грузового автомобиля с полуприцепом.

Из кривой зависимости угла поворота рулевого колеса от поперечного ускорения, используя одноколейную модель (см.главу «Динамика поперечного движения») можно определить эффект самовыравнивания. Конструкция современных автомобилей, как легковых, так и грузовых, как правило, предусматривает недостаточную поворачиваемость. Другими словами, при возрастании скорости во время движения по кривой с постоянным радиусом они требуют значительного увеличения угла поворота рулевого колеса. Предельный уровень недостаточной поворачиваемости автомобиля определяется максимальным направляющим усилием при повороте, вызывающим резкое увеличение угла поворота рулевого колеса при высоком поперечном ускорении.

Кривая зависимости угла крена от поперечного ускорения описывает боковой наклон автомобиля, который может ощущаться водителем. Угол крена также сильно зависит от нагрузки автомобиля, в особенности в случае коммерческих автомобилей. Из этого можно сделать вывод, что для коммерческих автомобилей с высоко расположенным центром тяжести, при полной загрузке, максимальное достижимое поперечное ускорение определяется не направляющими усилиями шин при повороте, а предельным моментом опрокидывания автомобиля.

В случае грузовых автомобилей угол крена дополнительно определяется не только в области центра тяжести автомобиля, но также, в связи с наличием слабой в торсионном отношении рамы и отдельного крепления водительской кабины, в нескольких фиксированных точках измерения (рис. 3).

Кривая зависимости угла дрейфа от поперечного ускорения является показателем поперечной устойчивости автомобиля, которая может ощущаться водителем и определяется прежде всего свойствами шин.

Кроме свойств шин значительное влияние на поведение автомобиля в установившемся режиме могут оказывать следующие параметры:

- нагрузка и распределение нагрузки между осями;
- жесткость пружин и амортизаторов;
- кинематические и эластокинематические перемещения компонентов подвески колес.

Переходные режимы

Методики испытаний в переходных режимах ([3], [4]) служат для определения реакций автомобиля на быстрые, динамические возмущения со стороны рулевого управления, например, во время выполнения быстрых маневров уклонения. Часто используемыми методиками испытаний и моделирования являются «Ступенчатое воздействие» и «Синусоидальное воздействие со стороны рулевого управления (частотная характеристика)».

Ступенчатое воздействие

Методика испытаний «Ступенчатое воздействие» заключается в том, что автомобиль начинает двигаться в прямом направлении с постоянной скоростью, а затем рулевое колесо резко поворачивается на определенный угол и остается в этом положении. Это приводит к движению по кругу с определенным постоянным поперечным ускорением. Для легковых автомобилей скорость изменения угла поворота рулевого колеса составляет приблизительно 360°/с, а поперечное ускорение – 4 м/с^2 при скорости движения 80 км/ч.

Во время этого маневра определяются временные задержки и значения перерегулирования скорости рыскания, поперечного ускорения, угла крена и угла дрейфа, при ступенчатом воздействии со стороны рулевого управления (рис. 4). С одной стороны, реакция автомобиля на это ступенчатое воздействие не должна быть слишком медленной, с другой стороны, не должно иметь место чрезмерное перерегулирование.

Синусоидальное воздействие со стороны рулевого управления (частотная характеристика)
Методика испытаний «Синусоидальное воздействие со стороны рулевого управления (частотная характеристика)» заключается в том, что во время движения с постоянной скоростью автомобиль подвергается синусоидальному воздействию со стороны рулевого управления. Угол поворота рулевого колеса изменяется в соответствии с синусоидальным законом. Амплитуда сигнала остается постоянной, а частота увеличивается, начиная с медленных перемещений рулевого колеса с частотой 0,2 Гц, и заканчивая быстрыми перемещениями с частотой 2,0 Гц. Амплитуда угла поворота рулевого колеса, как правило, выбирается таким образом, чтобы автомобиль оставался в линейном диапазоне движения. Например, в случае легковых автомобилей, это должно делаться таким образом, чтобы при минимальной частоте колебаний рулевого колеса и скорости движения 80 км/ч поперечное ускорение составило не более 4 м/с². Это дает возможность оценить поведение автомобиля во всем диапазоне частот.

Для оценки поведения автомобиля определяются такие параметры, как фазовый угол, момент, прилагаемый к рулевому колесу, скорость рыскания, поперечное ускорение, угол крена и угол дрейфа и строятся графики их зависимости от частоты колебаний рулевого колеса. Значения собственных частот, угла возникающего наклона и фазовых углов могут быть использованы в качестве критериев оценки подвижности и устойчивости автомобиля под действием динамических возмущений со стороны рулевого управления. Такая оценка для грузового автомобиля массой 18 т показана на рис. 5.

Кроме параметров, влияющих на поведение автомобиля в стационарных режимах, в случае динамичных маневров основное влияние оказывают демпфирующие свойства и моменты инерции автомобиля, а также динамические свойства шин, системы рулевого управления и подвески колес.

Рис. 4. Ступенчатое воздействие
(ненагруженный автомобиль, скорость движения 60 км/ч).
$\delta_н$ – угол поворота рулевого колеса;
φ – угол крена; a_{y0} – боковое ускорение;
ψ – скорость рыскания

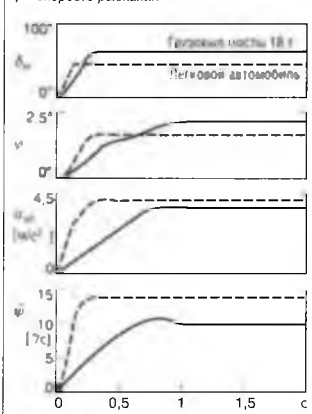
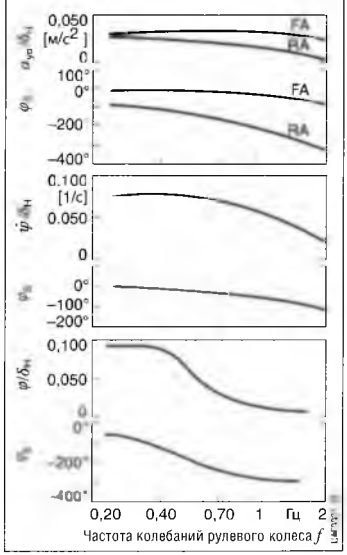


Рис. 5. Синусоидальное входное воздействие
(грузовой автомобиль, 18 т, скорость движения 60 км/ч).
$\delta_н$ – угол поворота рулевого колеса;
a_{y0} – боковое ускорение,
$\dot{\psi}$ – скорость рыскания;
φ – угол крена;
φ_5 – фазовый угол;
δ – амплитуда входного воздействия;
FA – передний мост; RA – задний мост



Испытания в режиме малых колебаний и в переходном режиме

Методики «Испытания в режиме малых колебаний» и «Испытания в переходном режиме» ([5], [6]) были разработаны для определения реакций автомобиля на небольшие, медленные перемещения рулевого колеса относительно положения прямолинейного движения. Поведение автомобиля и системы рулевого управления при этом хорошо согласуется с субъективными впечатлениями водителя о контролируемости автомобиля в процессе повседневной эксплуатации.

Испытания в переходном режиме

В ходе испытаний в переходном режиме автомобиль начинает движение в прямом направлении с постоянной скоростью движения, после чего рулевое колесо медленно поворачивается в сторону (например, при скорости 80 км/ч скорость поворота рулевого колеса составляет 5°/с) до перехода в режим движения по кругу с низким поперечным ускорением от 1 до 2 м/с^2. На практике это соответствует входу в поворот с низкой скоростью на второстепенной дороге.

Прежде всего выполняется оценка временных характеристик скорости рыскания и поперечного ускорения. Удобной количественной оценкой также может быть время реакции автомобиля на воздействие со стороны рулевого управления в форме рыскания, которое может ощущаться водителем.

Испытания в режиме малых колебаний

В ходе испытаний в режиме малых колебаний автомобиль во время движения с постоянной скоростью (например, 80 км/ч) подвергается синусоидальному воздействию со стороны рулевого управления с низкой частотой от 0,1 до 0,2 Гц. При этом максимальное поперечное ускорение составляет от 2 м/с^2 (для грузовых автомобилей) до 4 м/с^2 (для легковых автомобилей), т.е. автомобиль постоянно находится в линейном диапазоне движения.

Для оценки поведения автомобиля и влияния рулевого управления используются кривые зависимости момента, прилагаемого к рулевому колесу, поперечного ускорения, скорости рыскания и угла дрейфа от угла поворота рулевого колеса. Нелинейность (среди прочего, трение) в системе рулевого управления, шинах и подвеске колес вызывает образование гистерезисных петель, которые схематично показаны на рис. 6. Амплитуды гистерезиса и градиенты наклона кривых являются удобными критериями оценки. Например, поведение автомобиля, демонстрирующего переплетающуюся петлю гистерезиса, как автомобиль В на рис. 6, воспринимается водителем, как «индифферентность относительно центрального положения» и «плохая стабильность при прямолинейном движении».

Торможение на кривой/в повороте

Методика испытаний «Торможение на кривой/в повороте» ([7], [8]) также моделирует ситуа-

Рис. 6. Гистерезис при испытаниях в режиме малых колебаний

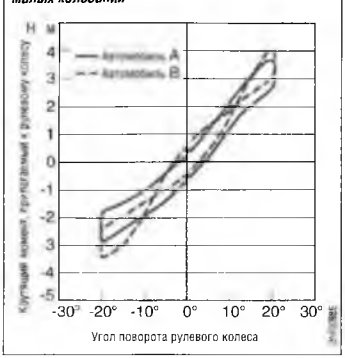


Рис. 7. Торможение на кривой/в повороте, временные характеристики
(нагруженный грузовой автомобиль массой 7,5 т): автомобиль равномерно движется по кругу; торможение начинается в момент 3,0 с; ψ – скорость рыскания; β – угол дрейфа; a_y – поперечное ускорение; a_x – продольное ускорение, R_0 – радиус круга



цию часто возникающую в ходе повседневного дорожного движения. Во время стационарного движения по кривой с поперечным ускорением от 3 м/с^2 (обычное значение для грузовых автомобилей) до 5 м/с^2 (обычное значение для легковых автомобилей) автомобиль тормозит с определенным замедлением, определяемым ходом педали тормоза, требуемым для его создания. Выполняются несколько испытаний с различными значениями замедления – от легкого до максимально возможного торможения.

На рис. 7 представлены временные характеристики скорости рыскания, бокового ускорения и угла дрейфа для грузового автомобиля массой 7,5 т во время торможения с замедлением 3 м/с^2. После начала торможения (отметка времени 3,0 с) на графиках можно видеть резкий скачок значений динамических параметров. Графики демонстрируют, что во время торможения при постоянном угле поворота рулевого колеса, установленном до начала торможения, автомобиль имеет тенденцию к повороту внутрь кривой движения.

В качестве критерия оценки устойчивости автомобиля используется степень изменения динамических количественных параметров в зависимости от переменного продольного замедления.[18].

Так же как параметры автомобиля, описанные выше, на поведение автомобиля во время этого маневра значительное влияние оказывает распределение тормозных сил между передней и задней осями и конструкция антиблокировочной тормозной системы ABS и системы курсовой устойчивости ESP. Большое значение также имеет настройка этих систем.

Список литературы

[1] ISO 4138 (2004): Passenger Cars, Steady-state circular driving behaviour; Open-Loop test methods..
[2] ISO 14792 (2003): Road vehicles, Heavy commercial vehicles and buses; Steady-state circular tests.
[3] ISO 7401 (1988): Road vehicles; Lateral transient response test methods.
[4] ISO 14793 (2003): Road vehicles, Heavy commercial vehicles and buses;
Lateral transient response test methods.
[5] ISO 13674 (2003): Road vehicles, Test method for the quantification of on-centre handling;
Part 1: Weave-Test
Part 2: Transition-Test.
[6] ISO 11012 (2008): Heavy commercial vehicles and buses, Open-loop test methods for the quantification of on-centre handling; Weave-Test and Transition-Test.
[7] ISO 7975 (2006): Passenger cars, Braking in a turn; Open-loop test method.
[8] ISO 14794 (2003): Heavy commercial vehicles and buses, Braking in a turn; Open-loop test method.
[9] Zomotor, A.
Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, Vogel-Verlag Wurzburg, 1987.
[10] Mitschke, M.
Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C, Fahrverhalten, Vogel-Verlag Wurzburg, 1987.
[11] ISO 3881-1, ISO 3881-2 (2002):
Passenger cars, test track for a severe lane change manoeuvre;
Part 1: Double lane change,
Part 2: Obstacle avoidance.
[12] ISO 9815 (1992): Road vehicles, passenger car/trailer combinations; lateral stability test method.
[13] ISO 14791 (2000): Road vehicles, Heavy commercial vehicle combinations and articulated buses; lateral stability test methods.
[14] ISO 12021 (1996): Road vehicles, Sensitivity to lateral wind;
Part 1: Open-loop test method using wind generator input.
[15] ISO 9816 (2006): Passenger cars, Power-off reaction of a vehicle in a turn; Open-loop test method.
[16] ISO 15037 (2006): Road vehicles, Vehicle dynamics test methods;
Part 1: General conditions for passenger cars,
Part 2: General conditions for heavy commercial vehicles and buses.
[17] ISO 8855 (1991): Road vehicles, Vehicle dynamics and road-holding ability; Vocabulary.
[18] von Glasner, E. C.
Einbeziehung von Prufstandsergebnissen in die Simulation des Fahrverhaltens
von Nutzfahrzeugen, Habilitation, University of Stuttgart, 1987.

Аэродинамика

Аэродинамические параметры

Основные параметры, т.е. силы моменты и коэффициенты, относящиеся к аэродинамическим характеристикам автомобиля приведены в табл 1.

Аэродинамическое сопротивление

Коэффициент аэродинамического сопротивления c_W описывает аэродинамическое поведение кузова автомобиля в воздушном потоке. Умножая c_W на динамическое давление воздушного потока:

$$q = 0{,}5\,\rho\,v^2$$

и на площадь поперечного сечения автомобиля A_{fx} получаем аэродинамическое сопротивление W. В отличие от важного значения W момент L относительно оси x не столь важен.

Подъемная сила

Вследствие криволинейной формы крыши автомобиля скорость воздушного потока, обтекающего эту поверхность, выше скорости потока в области днища. Это приводит к возникновению нежелательных подъемных сил, снижающих силы сцепления колес с дорогой и, следовательно, курсовую устойчивость автомобиля.

Коэффициент подъемной силы c_A равен сумме коэффициентов подъемной силы передней оси c_{AV} и задней оси c_{AH}. Разность между коэффициентами подъемной силы передней и задней осей называется «балансом подъемных сил» и является переменной, влияющей на курсовую устойчивость.

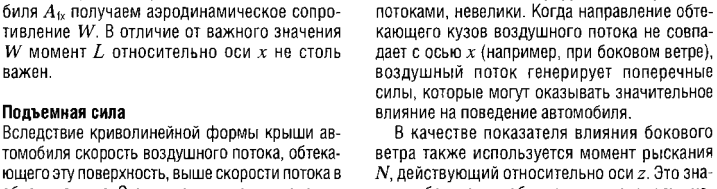
Вместо подъемной силы в конструировании часто используется момент продольной качки M, действующий относительно оси y. Положительный момент продольной качки требует недостаточной поворачиваемости, а отрицательный – избыточной поворачиваемости автомобиля.

Боковая сила

При взгляде спереди автомобиль имеет практически симметричную форму. Это означает, что боковые силы, генерируемые воздушными потоками, невелики. Когда направление обтекающего кузов воздушного потока не совпадает с осью x (например, при боковом ветре), воздушный поток генерирует поперечные силы, которые могут оказывать значительное влияние на поведение автомобиля.

В качестве показателя влияния бокового ветра также используется момент рыскания N, действующий относительно оси z. Это значение берется, чтобы получить скорость изменения угла рыскания и углового ускорения рыскания, которые являются показателями силы бокового ветра.

Таблица 1. Аэродинамические силы и моменты:
$q = 0{,}5\ \rho\ v^2$ (ρ – плотность; v – скорость воздушного потока); RS – колесная база; A_{fx} – площадь поперечного сечения автомобиля; коэффициенты подъемной силы: $c_{Vx} = 0{,}5\ c_z + c_M$ (отнесенный к передней оси), $c_{AH} = 0{,}5\ c_A - c_M$ (отнесенный к задней оси)



Величина	Единица измерения	Наименование	Коэффициент
W	Н	Сопротивление в направлении x	$c_w = W/(q\ A_{fx})$
S	Н	Боковая сила в направлении y	$c_S = S/(q\ A_{fx})$
A	Н	Подъемная сила в направлении z	$c_A = A/(q\ A_{fx})$
L	Н·м	Момент крена относительно оси x	$c_L = L/(q\ A_{fx}\ RS)$
M	Н·м	Момент продольной качки относительно оси y	$c_M = M/(q\ A_{fx}\ RS)$
N	Н·м	Момент рыскания относительно оси z	$c_N = N/(q\ A_{fx}\ RS)$

Автомобильные аэродинамические трубы

Применение

Автомобильные аэродинамические трубы используются для как можно более реалистичного и воспроизводимого моделирования воздушного потока, воздействующего на автомобиль во время движения по дороге. Однако, по своей природе реальные условия движения весьма изменчивы. Так, направление и сила ветра постоянно изменяются вследствие таких факторов, как естественные изменения, застройка и дорожное движение.

Преимущества использования аэродинамических труб в качестве инструмента экспериментальных разработок, по сравнению с дорожными испытаниями, заключаются в воспроизводимости условий испытаний, сравнительно несложной, надежной и быстродействующей технике измерений и возможности изолировать те или иные эффекты, которые в реальных условиях изолированно не возникают (например, шум во время движения). В аэродинамической трубе конструкторские прототипы, которые не могут быть выпущены на дорогу, могут быть аэродинамически оптимизированы с гарантированной секретностью.

Типы аэродинамических труб

При помощи аэродинамических труб определяются аэродинамические параметры автомобиля. Трубы различаются по способу направления воздушного потока, конструкции испытательной секции и способу моделирования дорожной поверхности (см. табл. 2).

Замкнутые аэродинамические трубы с закрытой рабочей частью называются «Геттингенскими трубами», а системы с возвратом потока – «трубами Эйфеля» (рис. 1).

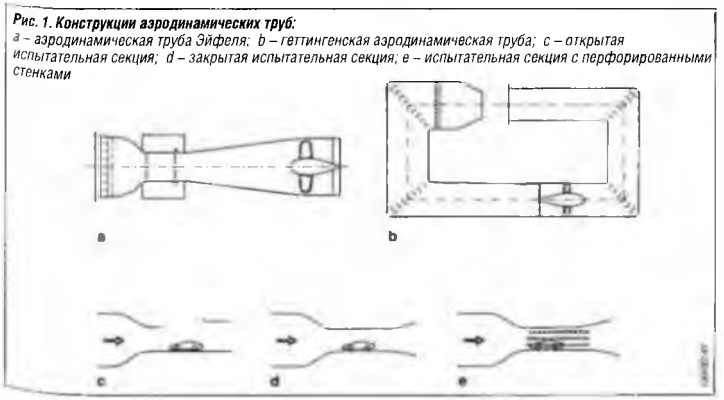
Стандартное оборудование аэродинамических труб

Испытательная секция может быть открытого типа, закрытого типа или перфорированными стенками. Она характеризуется сечением на выходе диффузора, сечением коллектора и длиной (см. табл. 2).

Также важным параметром является коэффициент препятствия $\Phi_N = A_{tx}/A_N$. Это отношение площади поперечного сечения автомобиля A_{tx} к поперечному сечению диффузора A_N. На дороге это отношение $\Phi_N = 0$, поэтому в аэродинамической трубе оно должно быть как можно меньше. С учетом конструкции и эксплуатационных затрат обычным значением на практике является $\Phi_N = 0{,}1$. Это соответствует поперечному сечению диффузора приблизительно 20 м².

Скорость и стабильность воздушного потока в аэродинамической трубе определяются сужением и формой диффузора. Большое значение коэффициента поджатия κ, представляющего отношение площадей сечений форкамеры и выпускной части диффузора ($\kappa = A_V/A_D$), дает равномерное распределение скорости, низкую турбулентность и высокое значение ускорения воздушного потока.

Рис. 1. Конструкции аэродинамических труб:
a – аэродинамическая труба Эйфеля; b – геттингенская аэродинамическая труба; c – открытая испытательная секция; d – закрытая испытательная секция; e – испытательная секция с перфорированными стенками



Контур диффузора может влиять на стабильность профиля скорости потока на выходе диффузора в испытательной секции и параллельность потока геометрической оси трубы.

Форкамера

Форкамера располагается перед диффузором, в области наибольшего сечения аэродинамической трубы. Форкамера содержит выпрямители потока, фильтры и теплообменники, служащие для повышения качества воздушного потока в отношении стабильности и направления и поддержания постоянной температуры в канале.

Для исследования аэродинамики автомобилей в основном используются Геттинские аэродинамические трубы с открытыми испытательными секциями или с перфорированными стенками.

Вентиляторы

Большинство аэродинамических труб могут создавать воздушные потоки со скоростью далеко за 200 км/ч. Однако такие скорости используются редко, например, для испытаний функциональной безопасности компонентов кузова и их стойкости к ветровым нагрузкам. Это связано с тем, что такие испытания требуют полной мощности вентилятора до 5000 кВт.

Обычно измерения выполняются при скорости воздушного потока 140 км/ч. При такой скорости аэродинамические коэффициенты могут быть определены достоверно и с низкими затратами. Скорость воздушного потока регулируется путем изменения скорости вращения вентилятора или положения лопастей вентилятора при постоянной скорости вращения (см. табл. 3).

Таблица 2. Автомобильные аэродинамические трубы в Германии (примеры)

Владелец аэродинамической трубы	Площадь сечения диффузора в м^2	Площадь сечения коллектора в м^2	Длина испытательной секции в м	Конструкция испытательной секции	Система моделирования дороги
Audi	11,0	37,4	9,5–9,93	открытая	с 5 движущимися лентами
BMW	20,0	22,1	10,0	открытая	–
Daimler AG	32,0	53,6	12,2	открытая	–
IVK Stuttgart	22,5	26,5	9,9	открытая	с 5 движущимися лентами
Ford	23,8	28,2	9,7	открытая	–
Porsche	22,3	37,7	13,5	с перфорированными стенками/ открытая	–
Volkswagen	37,5	44,8	10,0	открытая	–

Таблица 3& Вентиляторы аэродинамических труб

Аэродинамическая труба	Мощность привода, кВт	Диаметр вентилятора, м	Регулирование
Audi	2600	5,0	мин$^{-1}$
BMW	2 x 900 [1]	2 x 4,97 [1]	мин$^{-1}$
Daimler AG	5000	8,5	мин$^{-1}$
IVK Stuttgart	2950	7,1	мин [1]
Ford	1650	6,3	мин [1]
Porsche	2600	7,4	мин [1]
Volkswagen	2600	9,0	Регулирование положения лопастей вентилятора

[1] *В аэродинамической трубе BMW используются два синхронизированных вентилятора.*

Динамометр аэродинамической трубы

Динамометр аэродинамической трубы служит для регистрации аэродинамических сил, воздействующих на испытуемый автомобиль, и моментов относительно всех точек контакта шин с поверхностью, которые используются для вычисления аэродинамических параметров, действующих в направлении осей x, y и z.

Динамометр аэродинамической трубы обычно расположен под поворотной платформой, служащей для поворота автомобиля относительно направления воздушного потока, т. е. для моделирования таким образом бокового ветра.

В отличие от реальной ситуации, автомобиль в аэродинамической трубе неподвижен и обтекается воздушным потоком. Поэтому влияние перемещения автомобиля относительно дороги не может быть учтено. Однако в последнее время было сооружено несколько аэродинамических труб, на которых в пол встроены движущиеся ленты, служащие для моделирования движения автомобиля по дороге и вращения колес (см. рис. 2). Это позволяет повысить качество прохождения воздушного потока между автомобилем и дорогой и значительно приблизить условия в трубе к реальным условиям.

Вспомогательные системы аэродинамических труб

Система измерения площади поперечного сечения

Система измерения площади поперечного сечения (лазерная или на приборах с зарядовой связью) измеряет площадь поперечного сечения автомобиля оптическими средствами. Результаты измерений используются для вычисления аэродинамических коэффициентов и значений сил, измеренных в аэродинамической трубе.

Современные системы датчиков давления в аэродинамических трубах (например, плоские датчики давления, крепящиеся к поверхности кузова) могут одновременно регистрировать изменения давления как мини-

Рис. 2. Поворотная платформа на полу аэродинамической трубы с встроенной движущейся лентой:
1 – движущаяся лента между колесами;
2 – динамометр;
3 – поворотная платформа;
4 – узел привода колес с малой движущейся лентой

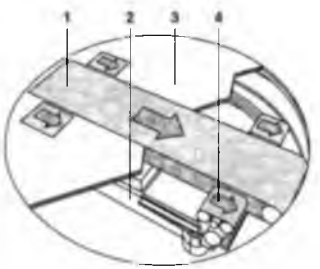
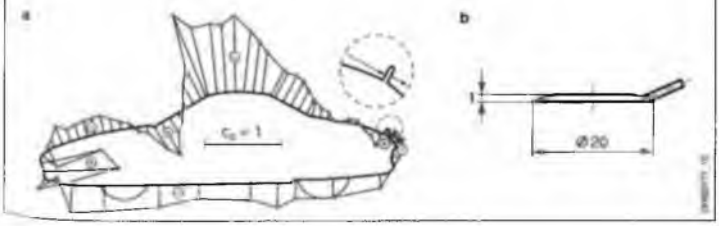


Рис. 3. Система определения распределения давления (пример применения):
a – распределение давления по поверхности средней части автомобиля ($y = 0$), измерения с использованием 63 плоских датчиков;
b – плоский датчик давления



мум в 100 точках. Миниатюрные (кварцевые) датчики давления во всех точках измерения выдают информацию в электронной форме с относительно высокой частотой (см. рис. 3).

Траверсная люлька
Траверсная люлька позволяет выполнить измерения во всем поле обтекающего автомобиль воздушного потока. Каждая точка испытуемого образца может быть описана координатами и воспроизведена. По показаниям датчиков, установленных во всех точках, затем могут быть определены значения давления, скорости и уровня шума в каждой точке.

Дымовые струи
Дымовые струи используются для визуализации воздушного потока, который в противном случае является невидимым. Дымовые струи позволяют выявить те или иные неоднородности воздушного потока, которые могут стать причиной недостоверных результатов измерений вследствие снижающей энергию турбулентности. Нетоксичный «дым» обычно производится посредством нагрева смеси этиленгликоля в паромасляном генераторе. Другие методы визуализации воздушного потока включают:
- ленты на поверхности кузова;
- ленточные датчики;
- фотографии потока с использованием быстросохнущей смеси парафина или талька;
- генераторы пузырьков гелия,
- лазерные системы.

Система дисперсии загрязняющих агентов
Система дисперсии загрязняющих агентов может использоваться для орошения автомобиля в аэродинамической трубе водой с различной интенсивностью – от легкого тумана до сильного дождя. Картины распределения потоков могут быть визуализированы и задокументированы путем добавки к воде мела или флуоресцирующего вещества.

Блок подачи горячей воды
Блок подачи горячей воды обеспечивает подачу горячей воды с постоянным расходом для определения охлаждающей способности радиаторов на прототипах, которые не могут быть выпущены на дорогу.

Варианты аэродинамических труб
Сооружение автомобильных аэродинамических труб требует крупных капиталовложений. Эти капиталовложения в сочетании с высокими эксплуатационными затратами делают трубы дорогостоящим оборудованием с высокой почасовой ставкой стоимости использования. Только очень частое использование автомобильных аэродинамических труб для аэродинамических, аэроакустических и температурных экспериментов может оправдать сооружение нескольких специализированных аэродинамических труб для выполнения различных задач.

Аэродинамические трубы для испытаний на моделях
Аэродинамические трубы для испытаний на моделях значительно снижают эксплуатационные затраты, благодаря менее строгим конструктивным требованиям и меньшей технической сложности. В зависимости от масштаба (от 1:5 до 1:2), можно легко, быстро и экономично изменять форму моделей автомобилей.

Испытания на моделях в основном проводятся на ранних этапах разработки для оптимизации базовой аэродинамической формы кузова. При поддержке дизайнеров «пластилиновые» модели используются для оптимизации формы кузова или для формирования полного ряда вариантов перед испытаниями их аэродинамического потенциала.

Используя новые методы производства (быстрое создание прототипов), модели можно создавать быстро, точно и во всех деталях. Это позволяет выполнять на моделях важные исследования с целью оптимизации деталей, даже по окончании этапа разработки формы кузова.

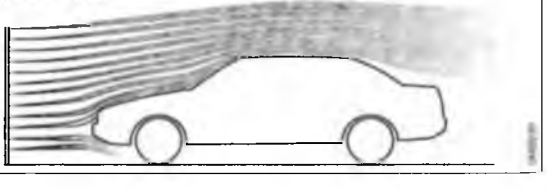


Рис. 4. Использование «дымового гребня» и дымовых струй для визуализации воздушного потока

Акустические аэродинамические трубы

В акустических аэродинамических трубах, благодаря надежной звукоизоляции, уровень звукового давления приблизительно на 30 дБ (А) ниже, чем в стандартных трубах. Это обеспечивает достаточно высокое отношение сигнал/шум, составляющее более 10 дБ (А), что позволяет идентифицировать и оценить шумы, генерируемые в результате циркуляции и сквозного потока воздуха.

Аэродинамические трубы с системами климат-контроля

Аэродинамические трубы с системами климат-контроля используются для теплового анализа и разработки систем защиты автомобиля в определенных температурных диапазонах при различных условиях нагрузки.

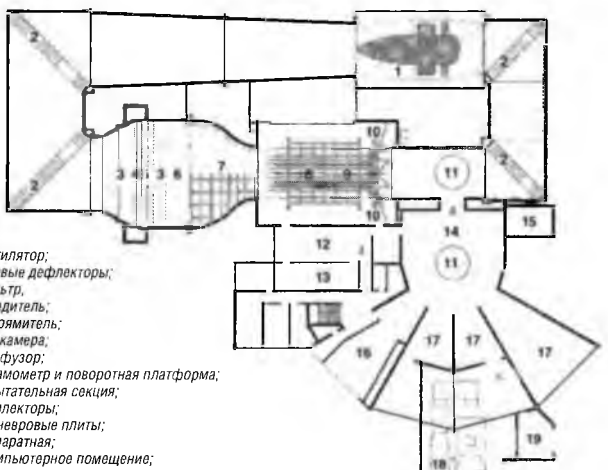
Для поддержания температуры в диапазоне от –40 °С до +70 °С с высокой точностью (±1 К) служат большие теплообменники.

Автомобиль устанавливается на динамометрических роликах и «приводится в движение» при требуемых условиях нагрузки или в условиях циклического изменения нагрузки. Скорости воздушного потока и вращения роликов должны быть точно согласованы, даже при низких скоростях. При необходимости, с целью учета влияния действующих в реальной ситуации факторов, могут моделироваться условия движения на подъем или под уклон.

Также может регулироваться влажность воздуха или при помощи ламп может имитироваться солнечное излучение.

Тем не менее, не все проблемы, возникающие при проработке аэродинамики автомобилей, могут быть решены посредством описанных выше испытаний. В дополнение к экспериментальным исследованиям производители все более широко используют модели CFD (вычислительной гидродинамики). Они позволяют выработать предварительные решения с целью снижения нагрузки на испытательное оборудование.

Рис. 5. Автомобильная аэродинамическая труба (пример - Акционерное общество почетного доктора инж. наук Фердинанда Порше - Геттингенская аэродинамическая труба):



1 – вентилятор;
2 – угловые дефлекторы;
3 – фильтр,
4 – охладитель;
5 – выпрямитель;
6 – форкамера;
7 – диффузор;
8 – динамометр и поворотная платформа;
9 – испытательная секция;
10 – коллекторы;
11 – маневровые плиты;
12 – аппаратная;
13 – компьютерное помещение;
14 – центральная диспетчерская;
15 – подъемник,
16 – вход;
17 – подготовительные помещения;
18 – аэродинамическая труба для испытаний на моделях в масштабе 1:4;
19 – аппаратная аэродинамической трубы для испытаний на моделях

Акустика автомобиля

Измерение уровня шума и предельные значения для автомобилей в соответствии с требованиями законодательства

Методики измерения уровней шума, используемые для определения его предельных значений в соответствии с требованиями законодательства, касаются исключительно внешних уровней шума. Директива ЕС 70/157/EEC вступившая в силу в 1970 году, вместе с ее последней редакцией 2007/34/EEC [1], определяет методы измерений и предельные значения уровней шума, создаваемого неподвижными и движущимися автомобилями. В связи с неадекватной применимостью положений законодательства к реальным ситуациям, возникающим в реальных условиях дорожного движения, законодатели ЕС в настоящее время работают в области пересмотра процедур измерения уровней шума в целях лучшего воспроизведения реальных условий городского дорожного движения. Директива 2001/43/EEC [2] включает дополнительный раздел, посвященный уровню шума, производимого шинами в диапазоне скоростей 80 км/ч.

Измерение уровней шума движущихся легковых автомобилей и грузовых автомобилей с разрешенной полной массой до 3,5 т

Автомобиль приближается к линии AA, находящейся на расстоянии 10 м от створа микрофона, с постоянной скоростью 50 км/ч (рис.1), а затем ускоряется «с полным газом» до линии BB (удаленной также на 10 м от створа микрофона). Легковые автомобили с 4-ступенчатой механической коробкой передач испытываются на второй передаче. Для автомобилей с более чем четырьмя прямыми передачами измерения выполняются последовательно при движении на второй и третьей передачах, для спортивных автомобилей - на третьей передаче, в соответствии с определением, приведенным в Директиве. Для автомобилей с автоматической трансмиссией измерения выполняются при положении рукоятки селектора D.

Уровень шума определяется, как максимальный уровень звука, измеренный справа и слева от автомобиля на расстоянии 7,5 м от средней линии полосы движения. Если уровни шума измеряются во время движения на двух передачах, за уровень шума принимается среднее арифметическое значение двух результатов.

Рис. 1. Схема измерения уровня шума движущихся автомобилей:
1 – поверхность дороги в соответствии с ISO 10844 [3]; 2 – левый микрофон; 3 – правый микрофон

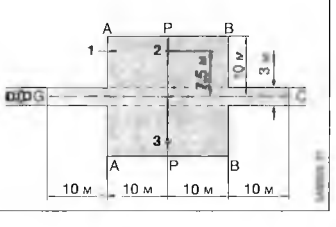


Таблица 1. Пределы и допуски в дБ(А) для внешнего шума автомобилей в соответствии с [1]

Категория автомобиля 92/97/EEC с октября 1995	дБ (A)
Легковые автомобили	
с двигателем с искровым зажиганием или с дизельным двигателем	74 + 1
– с дизельными двигателями с непосредственным впрыском топлива	75 + 1
Автопоезда	
разрешенной полной массой менее 2 т	76 + 1
– с дизельными двигателями с непосредственным впрыском топлива	77 + 1
Автобусы	
разрешенной полной массой 2–3,5 т	76 + 1
– с дизельными двигателями с непосредственным впрыском топлива	77 + 1
разрешенной полной массой свыше 3,5 т	
– двигатели мощностью до 150 кВт	78 + 1
– двигатели мощностью свыше 150 кВт	80 + 1
Грузовые автомобили	
разрешенной полной массой 2–3,5 т	76 + 1
– с дизельными двигателями с непосредственным впрыском топлива	77 + 1
с разрешенной полной массой свыше 3,5 т (Немецкие правила лицензирования автомобильных перевозок: свыше 2,8 т)	
– двигатели мощностью до 75 кВт	77 + 1
– двигатели мощностью до 150 кВт	78 + 1
– двигатели мощностью свыше 150 кВт	80 + 1
Внедорожные и полноприводные автомобили В отношении этих автомобилей действительны более строгие дополнительные предельные значения уровня шума для моторных тормозов и пневматического оборудования	

Измерение уровня шума движущихся грузовиков с разрешенной полной массой более 3,5 т

Автомобиль движется до линии АА, которая удалена от створа микрофона на 10 м (рис. 1), а затем ускоряется «с полным газом» до линии ВВ (удаленной также на 10 м от створа микрофона). Скорость движения зависит от выбранной для испытаний передачи и номинальной величины оборотов двигателя. Выбор передачи определяется тем фактом, что в пределах испытательного участка должна быть достигнута как минимум номинальная скорость движения, но в то же время автомобиль должен пройти участок, не достигая предельно допустимых оборотов двигателя. Уровень шума определяется как максимальное значение из результатов всех измерений.

Шум от неподвижных транспортных средств

При контроле уровня шума от неподвижного автомобиля его замеры производят вблизи отверстия выхлопной трубы. При замере частоту вращения коленчатого вала доводят до 3/4 частоты, при которой двигатель достигает номинальной мощности. После установления постоянной частоты вращения педаль газа резко переводится в положение холостого хода. Во время этого процесса замеряется максимальное А-скорректированное значение уровня звукового давления на расстоянии 50 см от отверстия выхлопной трубы под углом (45 ± 10)° в горизонтальной плоскости к направлению выхода газов. Полученные данные в дБ(А) заносятся с пометкой «Р» (для отличия от данных, получаемых другими методами измерения) в паспорт автомобиля.

Каких-либо предельных значений для измерения уровня шума неподвижных автомобилей в сертификате типа испытаний не указано.

Внутренний шум

Внутренний шум не нормируется. Уровень внутреннего шума измеряется обычно при равномерном движении, начиная со скорости 60 км/ч или со скорости, составляющей 40 % от максимальной, как А-скорректированное значение уровня звукового давления, и наносится на график скорости. Первая зона измерения – место водителя. Другие точки измерения выбираются на уровне уха пассажира. В настоящее время указывать уровень внутреннего шума в виде одного значения не планируется.

Инженерная акустика

Оборудование для проведения акустических измерений

Указанные ниже средства измерений используются для измерения и оценки не только уровней внешнего шума, но также и внутреннего шума, в частности, шума, производимого вибрацией различных компонентов автомобиля ([4]):

- конденсаторные микрофоны для измерения звукового давления – определяют уровень звука в дБ(А);
- контактные ушные микрофоны для точного воспроизведения звука (с головными телефонами);
- камеры для акустических измерений – обычно оборудуются стенками с высокой степенью звукопоглощения;
- для измерения уровня вибрации и вибрационного шума используются датчики (как правило, массой менее 1 г), работающие, например, на пьезоэлектрическом эффекте. Лазерные виброметры, работающие на эффекте Допплера, используются для быстрых бесконтактных измерений.

Применение расчетных методов в акустике

Колебания и вибрации

Расчеты собственных частот вибраций выполняются с использованием метода конечных элементов (FEM). Коррекция модели с использованием экспериментального модального анализа или моделирования действующих сил позволяет выполнить расчеты реальных действующих форм вибрации. Таким образом конструкции могут быть оптимизированы на ранних стадиях разработки в отношении их вибрационных реакций и акустического излучения.

Оценка шума, распространяемого в воздушной и жидкой средах

Расчеты акустических полей излучения, например, в отсеках или полостях, выполняются с использованием метода конечных элементов (FEM) или метода граничных элементов (BEM) ([5]).

Акустический контроль качества

Такой контроль включает оценку шума и уровней помех, а также классификацию неисправностей на основе слышимого звука или структурного шума как части производственного процесса. Акустический контроль качества

применяется, в частности, при испытаниях электродвигателей во время их первоначальной эксплуатации. В некоторых специальных случаях могут использоваться автоматические испытательные устройства, однако они в настоящее время пока еще не в состоянии достичь человеческих уровней гибкости, избирательности и познавательной способности. Преимущества в этом отношении будут отданы интеллектуальным измерительным системам и комбинированным методам оценок акустических характеристик.

Акустическое проектирование

Определение

Акустическое проектирование – это активное и целенаправленное действие, имеющее целью получить желаемые акустические характеристики изделия Цель заключается в придании изделию специфического «звучания», ожидаемого покупателем, соответствующего сущности бренда и вызывающего вполне определенные эмоциональные ассоциации.

С конца 1980-х годов акустическое проектирование, специальная область акустики, постепенно стало важным инструментом применения технических разработок в отношении акустики и сегодня широко используется во многих областях. Наиболее известным является автомобильный сектор, где как покупатели, так и пресса проявляют большой интерес к результатам акустического проектирования изделий. Активные работы ведутся в этом направлении и в других областях, например в области разработки бытовых приборов (например, пылесосов и посудомоечных машин) и даже производства пищевых продуктов (особый хруст картофельных чипсов).

Кроме «акустического проектирования» часто встречаются и другие термины. Так понятие звукотехники, как правило, относится к конкретной технической реализации изделия в отношении его акустических свойств, разработанных на этапе акустического проектирования.

Качество звука относится к отдельным компонентам, которые пользователь может активно перемещать или включать и выключать, например, выключателям, рукояткам, сервомоторам, заслонкам и т.д. Здесь звуки, издаваемые этими компонентами, должны подчеркивать качество и надежность изделия.

Звук на автомобиле

Процесс реализации звука, вообще говоря, всегда остается одним и тем же. Поясним это на примере автомобильного сектора.

Звук можно рассматривать, как слышимый контур обратной связи в системе «водитель-автомобиль», посредством которого водитель воспринимает реакции автомобиля, например, на нажатие педали акселератора или выбор той или иной передачи. Соответственно, звук определяется рабочим режимом двигателя, т.е. величиной оборотов и нагрузкой и их изменением во времени, во время ускорения или замедления по сравнению с установившимся состоянием. К этому добавляются звуки, производимые во время пуска двигателя или работы на холостом ходу.

Чтобы водитель мог адекватно различать те или иные режимы, возникающие в процессе управления автомобилем, в смысле восприятия, требуется достаточная динамика изменения нагрузки. Она отражает величину выходной мощности двигателя и поэтому должна быть высокой, особенно на спортивных автомобилях. Важную роль играет то, каким образом происходит переход от минимальной нагрузки к полной. В зависимости от конструкции, реакция автомобиля на нажатие педали акселератора может субъективно восприниматься как «спонтанная» или «вялая», независимо от фактического, физически измеренного ускорения.

Следует различать внешний и внутренний шум. Внешний шум – это шум, распространяющийся по воздуху, генерируемый всеми компонентами, в основном двигателем, системой выпуска отработавших газов и системой воздухозабора. На акустические условия в салоне автомобиля также влияют вибрационный шум и пути распространения шума через кузов.

Концепция проектирования

В акустическом проектировании важнейшую роль играют базовые технические требования. В автомобилестроении они вполне определенно отражают концепцию двигателя (бензиновый или дизельный двигатель, электрический или гибридный привод), конструкцию двигателя (рядный, оппозитный или двигатель Ванкеля), количество цилиндров, и компоновку привода (переднее или заднее расположение двигателя, передний, задний или полный привод). Здесь следует обратиться к «наследственным факторам» авто-

мобиля, поскольку инженер-акустик должен руководствоваться выбранной концепцией.

Учитываются также образ изделия и сегмент рынка. Инженер-акустик, как правило, основывается на акустических характеристиках предыдущей модели с тем, чтобы обеспечить преемственность, но с новой интерпретацией.

Поскольку звук генерируется многими компонентами, на стадии проектирования необходимо принять много стратегически важных решений в отношении не только двигателя, но и всего автомобиля в целом, поскольку в дальнейшем внесение каких-либо изменений будет невозможно. Сюда относятся прежде всего системы воздухозабора и выпуска отработавших газов, концепции герметизации и демпфирования и типы опор двигателя и шасси. Во всех случаях приходится искать компромисс с другими областями проектирования.

Реализация

Источники шума

На автомобиле имеется большое количество источников шума, которые значительно различаются в отношении характера и уровня шума. Когда речь заходит о типичной акустической картине, решающую роль играют различные группы – привод с его механическими шумами, газодинамические процессы сгорания топлива, процессы, происходящие в системах воздухозабора и выпуска отработавших газов и кузов с его многочисленными компонентами и демпфирующими материалами. Также играют свою роль нежелательные шумы, производимые шинами и ветром.

В процессе акустического проектирования различают внешний и внутренний шум. Здесь важную роль играют изолирующие и демпфирующие свойства кузова. В целях повышения уровня комфорта шумы, производимые шинами и ветром, должны быть сведены к минимуму. Это предполагает наличие кузова с высокой степенью звукоизоляции. С другой стороны кузов должен быть достаточно «прозрачным», чтобы желаемый звук, производимый двигателем и системой выпуска отработавших газов мог выходить наружу. Здесь инженеры-акустики, разрабатывая эти компоненты и наделяя их новым звуком, руководствуются международными правилами, определяющими уровни внешнего шума (см. табл. 1). Для стран Евросоюза предельное значение в настоящее время составляет 74 дБ(А). В этом отношении эти общие нормативные положения не обязательно вступают в конфликт с целями акустического проектирования, поскольку громкость звука – это только один из аспектов; значительно более важную роль играет общий характер звука. Как было сказано выше, звук должен соответствовать изделию.

Техническая реализация

Двигатель

Шум двигателя в основном вызван механическим движением компонентов. Даже процессы сгорания топлива в цилиндрах вызывают вибрации в структуре двигателя. Во всех случаях вибрация, с одной стороны, передается через структурные элементы, а с другой стороны «излучается» в форме воздушного шума. При этом шумы также могут возникать на определенном расстоянии от источника колебаний. Эти процессы определяются чувствительностью поверхностей мембран и собственными частотами локальных структур.

Основными источниками шума являются приводы коленчатого и распределительного валов, картер двигателя, масляный поддон, крышка головки блока цилиндров, вспомогательные устройства (например, генератор и насос системы охлаждения) и ременные передачи. Все эти компоненты совместно формируют базовую акустическую картину агрегата (двигатель/трансмиссия).

Основная задача инженера-акустика заключается в том, чтобы определить отдельные многочисленные источники шума, записать эти шумы и внести соответствующие технические изменения с целью гармонизации вибрационных и акустических характеристик автомобиля. Гармонизация акустики двигателя представляет собой очень сложный процесс. Инженер-акустик должен иметь в своем распоряжении самые различные данные и средства, включая:

- допуски, зазоры и структуры;
- тепловое расширение в зазорах;
- меры по предотвращению резонанса;
- выбор материала;
- картины вибрации двигателя/трансмиссии;
- конструкцию глушителя.

Здесь в большинстве случаев возникает конфликт интересов с другими аспектами разработки конструкции. Так, на четырехцилиндровых двигателях часто доминирующие

составляющие второго порядка, воспринимаемые как неприятный гул, могут быть значительно уменьшены при помощи уравновешивающих валов и посредством повышения жесткости конструкции. Однако это связано с увеличением веса, усложнением конструкции и заметным ухудшением рабочих характеристик.

Опоры двигателя/трансмиссии
Расположение и конструкция опор двигателя/трансмиссии (системы подвески силового агрегата к кузову), которые также являются важными элементами передачи звука, значительно влияют на уровень шума в салоне автомобиля. Жесткие опоры улучшают динамику автомобиля, но в то же время передают в салон очень неприятный шум двигателя, а также его вибрацию на кузов. Для придания определенной мягкости и повышения комфорта могут быть использованы изолирующие, гидравлически демпфированные элементы.

Системы выпуска отработавших газов и воздухозабора
Всасываемый в циллиндры воздух, участвующий в процессе сгорания топлива для образования и передачи энергии, затем выводится в окружающую среду через систему выпуска отработавших газов. Конструкция выпускных коллекторов, выхлопных труб и глушителей оказывает огромное влияние на частоты и уровни акустического излучения компонентов. Здесь важно учитывать выход звука не только через те или иные отверстия, но также через поверхности всех компонентов. Изменения уровней шума, производимого этими источниками, могут быть очень большими, легко достигая 15 дБ, например, при переходе из режима холостого хода к режиму полной нагрузки двигателя. На основе этой динамики этот источник идеально подходит для целей акустического проектирования.

Кузов
Кузов является главной границей раздела между внешним и внутренним шумом. Концептуально его основные функции заключаются в обеспечении пространства для размещения пассажиров и багажа, их защите и изоляции от внешних воздействий, таких как шум, производимый шинами и ветром.

В процессе оптимизации акустики кузова важно обеспечить гармоничность элементов конструкции в отношении соединений поверхностей мембран, источников вибрационного шума и опор двигателя/трансмиссии. Также акустически настраиваются перепускные каналы, уплотнения и элементы звукоизоляции. Здесь также имеются многочисленные конфликты целей, поскольку многие меры по улучшению акустических характеристик сопровождаются увеличением веса автомобиля.

Методы оценки
Технология «искусственной головы»
Акустическое проектирование автомобиля является сложной задачей, которая может быть выполнена только в процессе сравнения друг с другом различных технических решений. Технология «искусственной головы» или манекена предоставляет возможность достоверной регистрации параметров при различных технических решениях с тем, чтобы затем их можно было сравнить. Таким образом можно сравнить друг с другом большое количество вариантов и уменьшить объем дорогостоящих испытаний непосредственно на автомобиле.

Психоакустика
Звук невозможно оценить при помощи стандартных методов оценки. Когда речь идет о звуке, производимом автомобилем, по большей части используются такие слова как «спортивный», «звучный», «агрессивный» или «впечатляющий». Эти оценки следует перевести на технический язык, чтобы на дальнейших этапах разработчики знали, какие спектры частот, динамика и иные переменные определяют эти субъективные впечатления. По этой причине эти субъктивные факторы все более широко учитываются и структурируются с целью установления критериев их оценки. На практике, в процессе психоакустической оценки (рис. 2) образцы звука оцениваются в соответствии с парами противоположных понятий.

Виртуальное моделирование

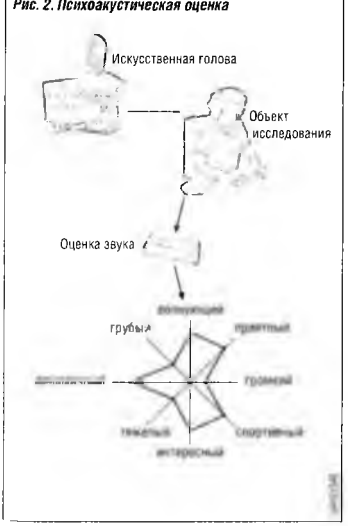
Результаты анализа и измерений, проводимых на отдельных компонентах, могут быть использованы для прогнозирования акустического поведения автомобиля в целом. Требуемая для этого запись звука производится с использованием технологии «искусственной головы». Вариации могут затем моделироваться в узком диапазоне с использованием современных компьютерных технологий. Желаемые акустические картины могут быть извлечены и сохранены в виртуальных записях звука. Эти записи в дальнейшем могут помочь определить желаемый звук.

С этой целью несколько объектов исследования оценивают разработанные звуки в соответствии с ранее установленными критериями оценки и присваивают им градации в пределах определенного периода времени. Эти «градации» вводятся при помощи клавиатуры и немедленно оцениваются компьютерной программой.

Таким образом становится возможно определить предпочтения оценивающего, которые теперь будут технически сохранены и позволят определить, какие элементы являются необходимыми или, наоборот, мешают, и влияние каких компонентов следует рассмотреть. Это дает возможность очень близко подойти к созданию желаемого звука, тем самым, внося вклад в обеспечение идентичности бренда изделия и его привлекательности.

Однако, что касается этой процедуры, необходимо заранее прояснить, может ли «виртуально созданный звук» быть также технически реализован.

Рис. 2. Психоакустическая оценка



Активный звук

Эта технология уже используется в течение определенного времени в производстве компьютерных игр и киноиндустрии. Однако, что касается ее применения в атомобилестроении, здесь необходимо тщательно взвесить все дополнительные затраты, увеличение веса, уменьшение свободного пространства и т.д. В настоящее время применение этой технологии очень ограничено.

Список литературы

[1] EC Directive 70/157/EEC, Revision 2007/34/EC: Measurement procedures and limit values for noise emissions from stationary and moving vehicles.

[2] EC Directive 2001/43/EC: Tyres for motor vehicles.

[3] ISO 10844:1994, Acoustics – Specification of test tracks for the purpose of measuring noise emitted by road vehicles.

[4] Klaus Genuit: Sound-Engineering im Automobilbereich, 1st Edition, Springer-Verlag, 2010.

[5] L.C. Wrobel, M.H. Aliabadi: The Boundary Element Method, 1st Edition., Wiley-Verlag, 2002.

Двигатели внутреннего сгорания

Тепловые двигатели

Принцип действия и концепция

Двигатели внутреннего сгорания классифицируются как тепловые двигатели. Существенной особенностью теплового двигателя является прямой термодинамический цикл, который характеризуется совершением работы.

В отличие от тепловых двигателей тепловые насосы, также называемые холодильными машинами, характеризуются обратным термодинамическим циклом, т.е. требуют для своей работы внешнего привода.

Принцип действия тепловых двигателей всегда один и тот же. Рабочая среда сжимается с подводом энергии и соответствующим увеличением давления. За этим следует расширение, сопровождаемое совершением работы. В разомкнутых циклах среда, совершившая работу, выпускается наружу. В зам-

Таблица 1. Характеристики и принцип действия тепловых двигателей

Тепловой двигатель	Паросиловая установка	Двигатель Стирлинга	Паровой двигатель	Газотурбинный двигатель	Реактивный двигатель	Поршневой двигатель	Роторный двигатель Ванкеля
Идеальный термодинамический цикл	Ранкина	Эриксона	Паровой цикл	Джоуля	Джоуля	Зейлигера	Зейлигера
Типичная рабочая среда	H_2O, этанол	Воздух, гелий	H_2O	Воздух	Воздух	Топливно-воздушная смесь	Топливно-воздушная смесь
Направление цикла	Замкнутый		Разомкнутый				
Подвод энергии	Снаружи, за счет теплопередачи		Изнутри				
Термодинамический подвод энергии	Стационарный	Нестационарный	Нестационарный	Стационарный	Стационарный	Нестационарный	Нестационарный
Типичные источники энергии, виды топлива	Уголь, жидкое топливо, ядерное топливо	Любой источник тепла	Уголь, жидкое топливо	Метан, этан, пропан, бутан	Керосин	Дизельное топливо, бензин	Бензин
Способ передачи произведенной работы	Турбина	Поршень с возвратно-поступательным движением, ротационный поршень (ротор)	Поршень	Турбина	Количество движения (импульс силы)	Поршень с возвратно-поступательным движением	Ротационный поршень (ротор)
Типичное максимальное давление	50 бар	3 бар (воздуха)	50 бар	40 бар	40 бар	200 бар	60 бар
Типичное минимальное давление	0,05 бар	1 бар	1 бар	1 бар	1 бар	1 бар	1 бар
Типичный максимальный к.п.д	40 %	30 %	~25 %	40 %	40 %	~42 %	~30 35 %
Принцип действия	Сжатие, нагрев, испарение, перегрев, расширение	Сжатие, нагрев, расширение, охлаждение	Сжатие, нагрев, испарение, перегрев, расширение	Впуск, сжатие, горение, расширение		Впуск, сжатие, горение, расширение, выпуск	

кнутых циклах начальное состояние должно быть восстановлено путем охлаждения рабочей среды перед началом сжатия.

Многие тепловые двигатели характеризуются подводом энергии в процессе сгорания топлива (табл. 1). Во время сгорания топлива химически связанная в топливе энергия выделяется в виде тепла, необходимого для совершения цикла. В процессе горения происходит соединение веществ, содержащих углерод и водород, с кислородом (окисление), поэтому воздух с объемным содержанием кислорода приблизительно 21 % составляет значительную часть рабочей среды.

Направление цикла

Важным фактором, определяющим направление цикла, является способ подвода энергии. Здесь различаются стационарный (непрерывный) и нестационарный (циклический) подвод энергии. Для всех поршневых двигателей, включая двигатель Стирлинга, характерен нестационарный подвод энергии, который происходит, когда поршень находится в верхней мертвой точке такта сжатия, и объем цилиндра минимален.

Характерным для всех разомкнутых циклов является внутренний подвод энергии, достигаемый за счет подачи и сжигания топлива. В противоположность этому замкнутые циклы требуют подвода энергии через теплообменники. Здесь прямой контакт рабочей среды с продуктами горения, если не учитывать теплопроводность, отсутствует. Уникальным в этом отношении является паровой двигатель, в котором рабочая среда испаряется под действием теплового потока, создаваемого внешним источником, а затем поступает в поршневой двигатель.

Тепловые двигатели также различаются в отношении используемых источников энергии. Используются источники энергии трех видов: твердые, жидкие и газообразные. Главное преимущество тепловых двигателей, работающих по принципу разомкнутого цикла с внутренним подводом энергии, состоит в том, что они не требуют теплообменников для обеспечения требуемого направления цикла и, следовательно, имеют более компактную конструкцию. Это преимущество может быть проявлено в еще большей степени за счет применения жидкого топлива с высокой плотностью энергии. Газовые двигатели для легковых и коммерческих автомобилей также становятся все более привлекательными (благодаря низким эксплуатационным затратам и относительно небольшому расходу топлива). Таким образом, двигатели внутреннего сгорания являются наиболее совершенными из тепловых двигателей.

К. п. д.

Двигатель внутреннего сгорания хактеризуется разомкнутым циклом и внутренним сгоранием топлива. Нестационарный режим подвода энергии позволяет получить температуру рабочей среды, усредненную по массе, на тактах впуска и сжатия свыше 2500 К и усредненные пиковые давления свыше 200 бар с очень хорошим к.п.д., свыше 40%.

В двигателях со стационарным циклом ограничения, налагаемые свойствами материалов, не позволяют достигнуть давлений и температур такого порядка. В них достигаются только локальные пиковые температуры около 2500 К. Поэтому, например, газовые турбины имеют более низкий к.п.д. Паровые турбины с замкнуутым циклом достигают более высокого к.п.д., чем газовые, при умеренном давлении около 50 бар. Это достигается за счет значительного снижения уровня низкого давления. Максимальный к.п.д. прочих тепловых двигателей значительно ниже.

Двигатель внутреннего сгорания с возвратно-поступательным движением поршней

Двигатель внутреннего сгорания в его поршневом варианте является основным типом теплового двигателя, используемого в автомобилестроении. В поршневом двигателе возвратно поступательное движение поршней преобразуется во вращение коленчатого вала. В принципе двигатели могут работать на самых различных видах топлива, однако на сегодняшний день основными источниками энергии для них остаются дизельное топливо и бензин.

Рабочие циклы двигателя

Основные принципы

Цикл представляет собой термодинамический процесс, имеющий идентичные начальное и конечное состояния. Обычно цикл проходит через несколько изменений состояния, сопровождающихся совершением тепловым двигателем работы. При этом рабочая среда цикла претерпевает термодинамические изменения состояния.

Изменения состояния (см. Термодинамика) различаются в отношении того, совершается работа W в форме работы при изменении объема $\int pdV$ или имеет место теплообмен с окружающей средой $Q = \int TdS$. Диаграмма «давление-объем» (диаграмма p-V, рис. 1) демонстрирует, производится ли работа и в каком количестве, в то время как диаграмма «температура-энтропия» (диаграмма T-S, рис. 2) иллюстрирует теплообмен, происходящий в замкнутой системе.

Интеграл работы при изменении объема $\int pdV$ можно интерпретировать на диаграмме p-V, как площадь, заключенную между линиями изменения состояния. Если цикл направлен вправо, по часовой стрелке, т.е. область располагается справа от линии изменения состояния, интеграл является в математическом смысле положительным. При этом цикл совершает работу. Рабочие циклы холодильных машин и компрессоров направлены влево, т.е. против часовой стрелки.

В дополнение к термину «работа при изменении объема» $\int pdV$, который обычно используется применительно к двигателям внутреннего сгорания, существует также термин «техническая работа» $W_t = \int Vdp$, который часто используется применительно к машинам с непрерывным потоком рабочей среды, таким как газовые турбины. Из интерпретации работы, как площади на диаграмме p-V, ясно, что обе формы работы в иллюстрируемом цикле в отношении количества идентичны.

Для совершения в цикле работы должен иметь место подвод тепла. В обратимом цикле (без энергии рассеивания E_d) количество добавленного тепла $Q = \int TdS$ равно интегралу температуры по изменению энтропии На диаграмме T-S количество тепла, добавленного в замкнутом цикле, соответствует замкнутой площади (рис. 2).

В соответствии с первым законом термодинамики (см. «Термодинамика»):

$$\int dU = \int TdS + \int dE_d - \int pdV,$$

где U означает энергию. Для обратимого цикла с идентичными начальной и конечными точками $\int dU = 0$. Количество тепла, подведенного к циклу, должно создаваться, в то время как рассеиваемое тепло возвращается неиспользуемым в окружающую среду. К.п.д. цикла, следовательно, определяется, как отношение общей произведенной работы W (сумма работ, совершенных подведенным

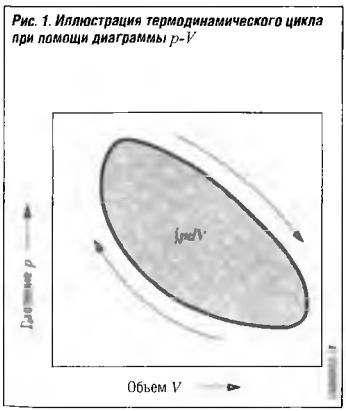


Рис. 1. Иллюстрация термодинамического цикла при помощи диаграммы p-V

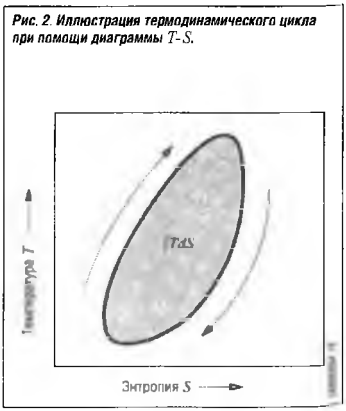


Рис. 2. Иллюстрация термодинамического цикла при помощи диаграммы T-S.

и рассеянным теплом) к количеству добавленного тепла Q_{add}.

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_{add}} = \frac{|\int pdV|}{Q_{add}}.$$

Идеальный цикл Карно

Поскольку каждый цикл, сопровождающийся совершением работы, предполагает подвод тепла, в ходе цикла также имеет место изменение температуры. В 1824 году Николя Леонард Сади Карно описал изменения состояния в цикле, который достигает максимального к.п.д. между двумя данными температурными пределами [1]. Поскольку наилучший к.п.д. может быть достигнут при отсутствии рассеивания тепла, подвод и рассеивание тепла должны происходить изотермически. Идеальным для совершения работы является адиабатический цикл. Цикл Карно, следовательно, состоит из изотермического поглощения и рассеивания тепла и изоэнтропического (адиабатического и обратимого) сжатия и расширения (рис. 3).

Применяя первый закон термодинамики, можно сделать вывод, что при изотермическом изменении состояния идеального газа внутренняя энергия остается неизменной, а работа равна количеству добавленного тепла. При этом применимо следующее выражение:

$$\int dU = \int TdS - \int pdV = 0.$$

При адиабатическом изменении состояния работа эквивалентна изменению внутренней энергии и, соответственно, температуры. При этом применимо следующее выражение:

$$\int dU = 0 - \int pdV.$$

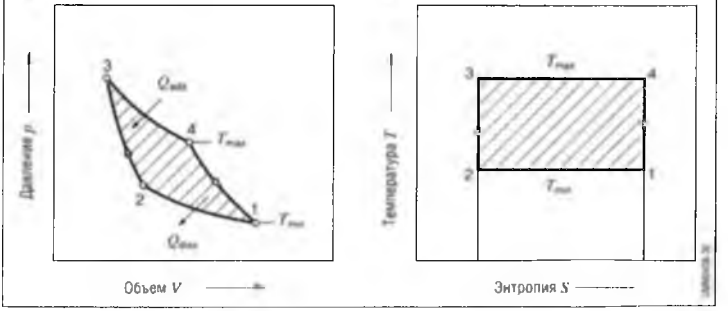
Для к.п.д. может быть выведено выражение [1]:

$$\eta_C = \frac{W}{Q_{add}} = \frac{Q_{add} - Q_{dis}}{Q_{add}} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}.$$

Этот тепловой к.п.д. является максимальным к.п.д., который может быть получен на машине, работающей в диапазоне двух температурных пределов. Никакой другой цикл не достигает к.п.д. такого уровня. Однако на практике выясняется, что работа, произведенная при данном изменении объема $V_{max} - V_{min}$, мала, и для достижения плотности энергии, сравнимой с другими циклами, требуются очень высокие пиковые давления p_{max}. Даже обеспечение практически изотермической теплопередачи затруднено, поскольку это требует применения больших теплообменников.

Отсюда следует, что в контексте тепловых двигателей этот цикл имеет скорее теоретическое значение, однако он играет важную роль в рассмотрении эксергии (максимальной работы, которая может быть получена при данном уровне энергии) и анэргии (энергии, которая не может быть использована), а также в отношении тепловых насосов и холодильных установок.

Рис. 3. Цикл Карно:
a – отображение в форме диаграммы p-V; b – отображение в форме диаграммы T-S



Основные циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

Поскольку фазы расширения и сжатия в двигателях с возвратно-поступательным движением поршней могут быть описаны адиабатической кривой, различные циклы отличаются способом подвода тепла. Процесс газообмена (цикл нагнетания) обычно заменяется теплообменом с окружающей средой (в целях упрощения предполагается, что процесс протекает при постоянной массе) для замыкания цикла.

Можно предположить, что подвод тепла в форме высвобождения химически связанной энергии («высвобождения тепла» или «процесса горения») может быть относительно медленным или очень быстрым. В цикле при постоянном объеме предполагается, что все тепло высвобождается в верхней мертвой точке (ВМТ) поршня за бесконечно малое время. Это изменение состояния может быть описано циклом при постоянном объеме.

Если высвобождение тепла происходит в течение конечного времени, можно предположить, что имеет место цикл при постоянном давлении. Здесь снижение давления вследствие расширения компенсируется повышением давления вследствие подвода тепла во время горения топлива.

Комбинация циклов при постоянном давлении и постоянном объеме представляет собой цикл Зейлигера при предельном давлении, посредством которого была сделана попытка приблизиться к реальному процессу сгорания топлива в поршневых двигателях.

Идеальный термодинамический цикл сгорания (цикл при постоянном объеме)

Предполагается, что подвод тепла в верхней мертвой точке осуществляется мгновенно и может быть описан, как изохорическое изменение состояния (рис. 4, 2⟶3). Цикл заряда (4⟶1) моделируется в упрощенной форме изохорическим рассеиванием тепла в окружающую среду. Таким образом, в течение этих двух фаз работа с изменением объема не производится: $W = \int pdV = 0$.

Сжатие (1⟶2) и расширение (3⟶4) рассматриваются как адиабатические процессы. Применение к этим двум фазам первого закона термодинамики дает $dU = -pdV$, т.е. $W_{12} = mc_v(T_2 - T_1)$, а $W_{34} = mc_v(T_4 - T_3)$ относится к произведенной работе [1].

В соответствии с первым законом термодинамики $dU = TdS$ на стадии 2⟶3, а количество добавленного тепла

$$Q_{23} = mc_v(T_3 - T_2).$$

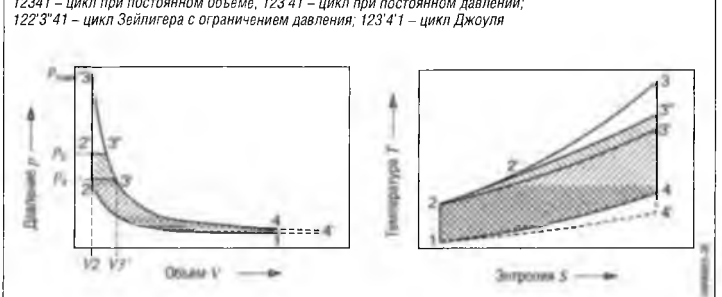
Таким образом к.п.д. η_{th} может быть определен как:

$$\eta_{th} = \frac{|\sum W|}{Q_{add}} = \frac{T_1 - T_2 + T_3 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2},$$

где подвод тепла осуществляется на протяжении всех стадий цикла, а Q_{add} обозначает количество добавленного тепла. Предполагая, что расширение и сжатие являются адиабатическими, можно показать, что:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}.$$

Рис. 4. Идеальные циклы при постоянном объеме:
a – отображение в форме диаграммы p-V; b – отображение в форме диаграммы T-S;
12341 – цикл при постоянном объеме, 123'41 – цикл при постоянном давлении;
122'3"41 – цикл Зейлигера с ограничением давления; 123'4'1 – цикл Джоуля



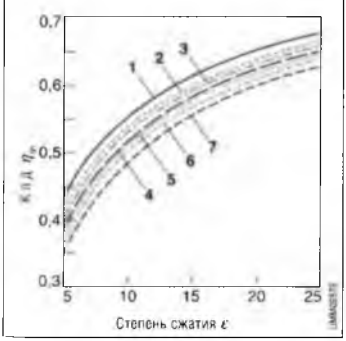
Таким образом, в целях упрощения:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa}$$

Предполагается, что теплоемкости во время сжатия и расширения идентичны. Этот способ выведения к.п.д. из степени сжатия ε и изоэнтропической экспоненты κ предполагает, что газ является идеальным.

При увеличении степени сжатия к.п.д. возрастает (рис. 5 и 6). В бензиновых двигателях степень сжатия ограничивается детонацией. Обычно для бензиновых двигателей с атмосферным всасыванием воздуха коэффициент сжатия составляет ε = 10 - 12, а максимальное давление – приблизительно 60 бар. Двигатели с турбонаддувом, вследствие ограничений, связанных с детонацией, имеют более низкую степень сжатия, равную ε = 9 - 10. При этом достигаются пиковые давления до 120 бар. Двигатели с прямым впрыском топлива и послойным распределением заряда топлива имеют степень сжатия ε > 12; при частичной нагрузке потенциал степени сжатия составляет даже до ε =14.

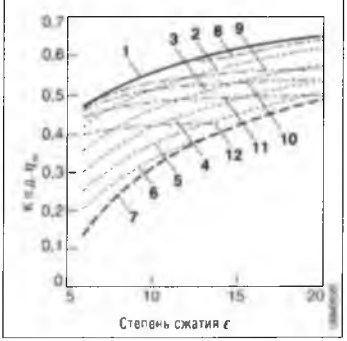
Рис. 5. К. п. д. идеальных циклов (количество добавленного тепла Q_{add} не постоянно):
1 – цикл при постоянном объеме, 2 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 1,5, ψ = 5,0; 3 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 1,5, ψ = 1,5; 4 – цикл при постоянном давлении, φ = 1,5; 5 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 2,0, ψ = 5,0; 6 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 2,0, ψ = 1,5; 7 – цикл при постоянном давлении, φ = 2,0; φ – коэффициент впрыска топлива; ψ – коэффициент повышения давления



Двигатель Стирлинга (Роберт Стирлинг, 1816. [1, 2, 3]) может работать в соответствии с принципом и переменного рабочего объема, но в своих реализованных формах изменений состояния демонстрирует сходство с циклами при постоянном объеме. Фазы адиабатического сжатия и расширения, однако, характеризуются изотермическими линиями. В принципе, это дает высокий к.п.д., идентичный к.п.д. цикла Карно.

Цикл при постоянном давлении
Естественно предположить, что для достижения высокой мощности процессы подвода и высвобождения тепла должны быть изобарическими (рис. 4). Этот цикл обычно используется в дизельных двигателях, которые ограничены в отношении пикового давления и работают с конечной продолжительностью

Рис. 6. К. п. д. идеальных циклов (количество добавленного тепла Q_{add} постоянно):
1 – цикл при постоянном объеме, 2 – цикл Зейлигера с ограничением давления φ = 1, ψ пер., 3 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 2, ψ пер., 4 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 3, ψ пер ; 5 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 4, ψ пер ; 6 – цикл Зейлигера с ограничением давления, φ = 5, ψ пер.; 7 – цикл при постоянном давлении, 8 – цикл Зейлигера с ограничением давления, p_{max} = 150 бар; 9 – цикл Зейлигера с ограничением давления, p_{max} = 100 бар; 10 – цикл Зейлигера с ограничением давления, p_{max} = 80 бар, 11 – цикл Зейлигера с ограничением давления, p_{max} = 60 бар; 12 – цикл Зейлигера с ограничением давления, p_{max} = 40 бар; φ – коэффициент впрыска топлива, ψ – коэффициент повышения давления



впрыска топлива и распространения пламени. Цикл заряда (4⟶1) снова моделируется в упрощенной форме, как рассеивание тепла в окружающую среду. Процессы сжатия (1⟶2) и расширения(3'⟶4) рассматриваются как адиабатические. Здесь применимы те же положения, которые были указаны для цикла при постоянном объеме.

Во время изобарического изменения состояния имеет место как подвод тепла, так и выполнение работы (2⟶3'). В качестве характеристического значения количества подведенного тепла используется объем в конце изобарического изменения состояния, называемый «объемом впрыснутого топлива» $V3'$ (рис. 4), и «определяется «коэффициент впрыска» $\varphi = V3'/V2$. Однако, его не следует путать с количеством впрыснутого топлива.

В соответствии с первым законом термодинамики, $dU = TdS - pdV$ на стадии 2⟶3' и для количества добавленного тепла:

$$Q_{23} = m c_v (T_{3'} - T_2) + p_{max} (V3' - V2).$$

Таким образом, к.п.д. может быть определен как

$$\eta_{th} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa} / \kappa \, (\varphi^{\kappa} - 1)/(\varphi - 1) .$$

Предположения аналогичны сделанным для цикла при постоянном объеме. К.п.д., достижимый при такой же степени сжатия, ниже, чем для цикла при постоянном объеме. Однако, поскольку дизельные двигатели работают с более высокой степенью сжатия, и их к.п.д. в общем случае выше (см. рис. 5 и 6). Следовательно, при разработке дизельных двигателей следует стремиться к получению высокого пикового давления.

Максимальные допустимые пиковые давления для двигателей легковых автомобилей составляют около 180 бар, а для двигателей коммерческих автомобилей – более 220 бар. Степень сжатия для процессов прямого впрыска топлива, применяемых в настоящее время, составляет ε = 16 - 19. В случае запаздывания впрыска конечное давление сжатия фактически соответствует пиковому давлению, и дизельный цикл имеет сходство с циклом при постоянном давлении с $\varphi \approx 9$.

Цикл Зейлигера с ограничением давления

В 1922 году Мирон Зейлигер описал комбинацию циклов при постоянном объеме и давлении (рис. 5). Процедура вывода здесь опущена [4].

Введя «коэффициент повышения давления» $\psi = p_{2'}/p_2$, можно вывести для к.п.д. следующее соотношение:

$$\eta_{th} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa} \cdot \frac{\psi\varphi^{\kappa} - 1}{\psi - 1 + \kappa\psi\,(\varphi - 1)} .$$

Значение к.п.д., как и ожидалось, лежит между к.п.д. циклов при постоянном давлении и при постоянном объеме (рис. 5 и 6).

Турбодвигатели: идеальный цикл

Турбодвигатели, в особенности газовые турбины и, следовательно, двигатели с турбонагнетателями отработавших газов работают при постоянном массовом расходе, а не в прерывистом режиме, как поршневые двигатели. Соответствующий идеальный цикл был впервые описан Джеймсом Прескоттом Джоулем около 1840 г., как калорический двигатель без потерь [4].

Предполагается, что процессы сжатия и расширения в крыльчатке компрессора и рабочем колесе турбины являются адиабатическими. Также предполагается, что за счет наличия камеры сгорания с постоянным потоком сгорание топлива представляет собой изобарический подвод тепла. В отличие от цикла при постоянном давлении с конечным расширением («расширением отсечки»), за счет выбранного принципа поршня, в цикле Джоуля расширение происходит до достижения давления окружающей среды (рис. 4).

Таким образом, теоретически может быть получено более высокое значение работы, и к.п.д. становится идентичен к.п.д. цикла при постоянном объеме. Введя коэффициент давления

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{max}}{p_1},$$

получаем следующее соотношение для к.п.д.:

$$\eta_{th} = 1 - T_1/T_2 = 1 - \Pi^{(\kappa-1)/\kappa}.$$

В зависимости от коэффициента давления Π к.п.д. может иметь высокие значения. Однако, когда дело касается реальных турбодвигателей, на коэффициент давления налагаются определенные ограничения (см. «Турбонагнетатели отработавших газов»). По этой причине газовые турбины часто делают многоступенчатыми, и высокая плотность мощности достигается в них за счет высокого массового расхода топлива.

Реальные циклы

Идеальные циклы подходят для демонстрации базовых соотношений. В случае новых двигателей с пока что неизвестными характеристиками они помогают рассмотреть принцип действия и оценить к.п.д. Однако, для детального анализа требуется выполнить расчет реального цикла.

Реальные циклы отличаются от идеальных. Различия заключаются в том, что теплоемкости рассматриваются зависимыми от температуры или давления. Измененный химический состав отработавших газов также аппроксимируется в виде соответствующих переменных с целью учета изменений физических свойств в процессе сгорания топлива. В частности, предполагается, что имеет место не адиабатическое изменение состояния, а как минимум, одна политропная кривая с экспонентой, адаптированной к тепловым потерям, или даже имеют место тепловые потери через стенки цилиндра, например при использовании подхода Вошни, в соответствии с теорией подобия Рейнольдса [4].

Цикл заряда рассчитывается с учетом потерь рассеивания (потерь потока и реальных сечений потока, см. «Гидромеханика») и также учитывается влияние остаточных отработавших газов. В отношении трения обычно используются эмпирические подходы, а теплотворная способность топлива вычисляется в зависимости от коэффициента избытка воздуха. В конечном итоге осуществляется детальное моделирование процессов подвода тепла (сгорания топлива и нагрева) и рассеивания тепла (теплопередачи).

Важным и простым способом быстрой оценки реального цикла является его описание в форме цепочки к.п.д. Здесь реальные циклы отображаются последовательно с учетом отдельных характеристических величин. Примером такой характеристической величины может служить механический к.п.д.

Общий коэффициент полезного действия

Общий или эффективный к.п.д. η_{eff} определяет количество эффективной энергии P_{eff} относительно энергии $Q_{max} = m_B H_u$, которая была подведена при массовом расходе топлива m_B и его низшей теплотворной способности H_u:

$$\eta_{eff} = \frac{P_{eff}}{Q_{max}}.$$

При высоких нагрузках дизельные двигатели имеют эффективный к.п.д. до 45 %; эффективный к.п.д. больших, тихоходных дизельных двигателей значительно выше. Эффективный к.п.д. бензиновых двигателей в лучшем случае может достигать 40 %.

Механический коэффициент полезного действия

Механический к.п.д. представляет собой отношение эффективной мощности P_{eff} к номинальной мощности P_{ind}. Номинальная мощность определяется из работы W (площадь характеристики $\int pdV$ для реального цикла) и времени t за один рабочий цикл, в соответствии со следующим соотношением:

$$P_{ind} = \frac{dW}{dt} \approx \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

Эффективная мощность отличается от номинальной мощности в основном учетом потерь на трение (в поршнях и подшипниках), потерь мощности в элементах управления (распределительный вал, клапаны), во вспомогательных агрегатах (масляный и водяной насосы, топливный насос, генератор). Для механического к.п.д.:

$$\eta_m = \frac{P_{eff}}{P_{ind}}.$$

Обычно механический к.п.д. зависит от нагрузки и при полной нагрузке может достигать 90 %, в то время как при низкой нагрузке (10 %) регистрируются значения около 70 %.

Фактор эффективности цикла

Фактор эффективности цикла описывает эффективность, с которой реальный цикл может быть аппроксимирован выбранным идеальным циклом. Поэтому он учитывает потери, в частности связанные с рассеиванием. Для детального анализа потерь рекомендуется разделить фактор эффективности между петлей высокого давления и петлей цикла заряда (см. табл. 2).

Обычно при расчете предполагается работа с идеальным газом, с зависимыми от температуры теплоемкостями, и используется идеальный цикл с геометрически идентичными размерами, таким же коэффициентом избытка воздуха, без остаточных отработавших газов, с полным сгоранием топлива и теплоизолированными стенками цилиндра. Описанный таким образом двигатель также называется «совершенным двигателем». Значение фактора эффективности цикла при полной нагрузке составляет приблизительно 80–90 %.

Если в расчете используется идеальный газ с постоянной теплоемкостью, можно ввести понятие «к.п.д. совершенного двигателя», который определяет мощность «идеального двигателя» относительно мощности «идеального цикла».

Коэффициент преобразования топлива

Бензиновые двигатели, работающие на богатой топливовоздушной смеси (коэффициент избытка воздуха $\lambda < 1$) дают высокое содержание HC и CO в отработавших газах, что обычно не может быть учтено при рассмотрении процесса подвода тепла через теплотворную способность топлива H_{uB}. Однако, экзотермичность этих газов H_u является значительной, что обычно проявляется в виде высоких температур отработавших газов на выходе из каталитического нейтрализатора отработавших газов окислительного типа. Это учитывается при помощи коэффициента преобразования топлива:

$$\eta_u = \frac{(H_{uB} - H_u)}{H_{uB}}.$$

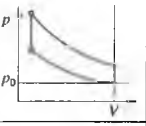
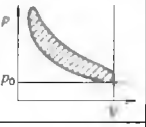
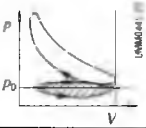
Для дизельных двигателей обычно $\eta_B = 1$. Для бензиновых двигателей это значение может снижаться до 0,95, а при очень богатой смеси с $\lambda < 1$ становиться еще ниже.

Цепь к.п.д.

Вся цепь к.п.д. может быть описана следующим образом (см. табл. 2):

$$\eta_{eff} = \eta_i \, \eta_m = \eta_{th} \eta_g \eta_m$$

Таблица 2. Графические представления и определения отдельных и общих к. п. д. двигателей с возвратно-поступательным движением поршней
Заштрихованные области отображают вновь совершенную работу (пояснения см. в тексте)

Диаграмма «давление–объем»	Описание	Граничные условия	Обозначение	К.п.д.
	Теоретический идеальный цикл, например, цикл при постоянном объеме	Идеальный газ, постоянная удельная теплоемкость, мгновенный подвод и рассеивание тепла и т.д.	$\eta_{th} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa}$ Теоретический или тепловой к.п.д.	
	Расчетный рабочий цикл высокого давления	Тепловые потери через стенки, реальный газ, конечная скорость подвода и рассеяния тепла, переменная удельная теплоемкость	η_{gHD} К.п.д. расчетного цикла высокого давления	
	Реальный рабочий цикл (4-тактный двигатель)	Потери на газообмен, нагрев топливоздушной смеси или воздуха и т.д.	η_{gLW} К.п.д. газообмена	
Механические потери, не могут быть представлены в удобном виде на диаграмме «давление–объем»	Потери на трение, охлаждение, вспомогательные агрегаты	Реальный двигатель	η_m	

Список литературы

[1] Stephan, P.; Schaber, K.; Stephan, K. Mayinger, F.: Thermodynamik. 17th Edition Volume 1, Springer-Verlag, 2007.
[2] Schleder, F.: Stirlingmotoren – Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung und Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren, 3rd Edition 2008, Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG.
[3] Hahne, E: Technische Thermodynamik. 4th Edition, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004.
[4] Woschni, G.: Die Berechnung der Wärverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren, MTZ 31 (1970) 12.
[5] Pischinger, R.; Klell, M.; Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine: Der Fahrzeugantrieb. 3rd Edition, Springer Vienna/New York, 2002.

Образование смеси, процесс сгорания, токсичные выбросы

Все двигатели внутреннего сгорания имеют одну общую черту – сгорание топлива происходит после всасывания свежей смеси или воздуха и последующего сжатия. В поршневых двигателях это происходит, когда поршень находится вблизи верхней мертвой точки (ВМТ). Результатом является повышение давления, которое через поршень и шатун передается на коленчатый вал в виде крутящего момента (рис. 1).

Последовательность сжатия и последующего сгорания топлива, с одной стороны, оказывает значительное влияние на характеристику давления и, следовательно, на к.п.д. и выходной крутящий момент. С другой стороны, эта последовательность определяет процесс образования токсичных продуктов горения. В этом отношении бензиновые и дизельные двигатели отличаются способом управления процессами.

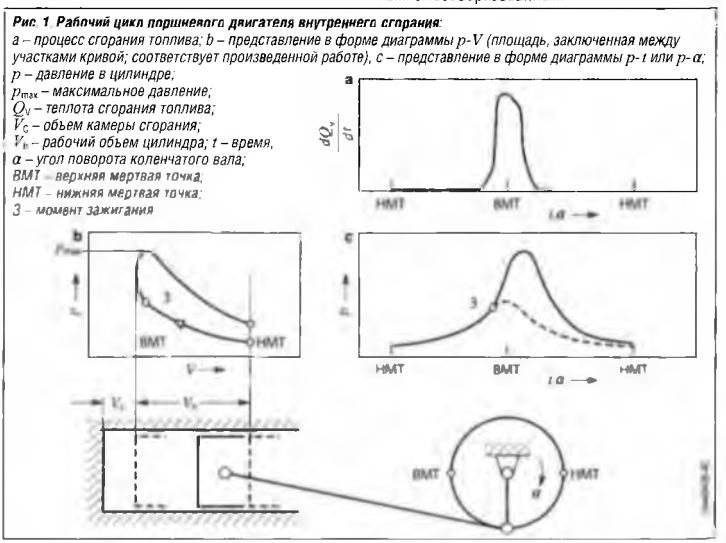
Двигатель с искровым зажиганием

Характерной чертой бензиновых двигателей является использование внешнего источника зажигания, обычно электродной свечи зажигания. В идеальном случае имеет место образование надлежащей топливовоздушной смеси, что обеспечивает требуемую воспламеняемость. Это достигается за счет внешнего смесеобразования (впрыск топлива во впускной трубопровод) или внутреннего смесеобразования (прямой впрыск топлива).

Образование смеси

В основном приготовление однородной смеси осуществляется на двигателях с искровым зажиганием, т.е. всасываемый воздух полностью смешивается с испаряемым и распыленным топливом во время тактов впуска и сжатия. Превосходная испаряемость бензина позволяет впрыскивать его во впускной трубопровод. С другой стороны, современные двигатели с послойным распределением заряда топлива характеризуются частично гетерогенным смесеобразованием.

Рис. 1. Рабочий цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания:
a – процесс сгорания топлива; b – представление в форме диаграммы p-V (площадь, заключенная между участками кривой, соответствует произведенной работе), c – представление в форме диаграммы p-t или p-α;
p – давление в цилиндре;
p_{max} *– максимальное давление;*
Q_V *– теплота сгорания топлива;*
V_c *– объем камеры сгорания;*
V_h *– рабочий объем цилиндра; t – время,*
α *– угол поворота коленчатого вала;*
ВМТ – верхняя мертвая точка;
НМТ – нижняя мертвая точка;
З – момент зажигания



На процесс смесеобразования оказывают значительное влияние условия испарения топлива, давление впрыска, движение заряда топлива в цилиндре и время, необходимое для гомогенизации смеси. В сущности, смесеобразование связано с взаимодействием двух процессов: испарение капелек топлива, вызванного разностью температур (см. рис. 2) и их расщепления под действием аэродинамических сил (см. рис. 3). Здесь различают впрыск топлива во впускной трубопровод и прямой впрыск топлива (см. табл. 1).

Впрыск топлива во впускной трубопровод

В случае впрыска топлива во впускной трубопровод перед впускным клапаном создается пленка топлива, масса которой уменьшается по мере возрастания скорости движения воздуха. Эта скорость движения воздуха линейно изменяется в зависимости от скорости вращения двигателя. Вследствие низкой температуры и неполного испарения топлива во впускном трубопроводе с образованием в результате топливной пленки, впрыск топлива во впускной трубопровод происходит при очень низком давлении впрыска, менее 10 бар.

Рис. 2. Испарение топлива:
1 – дизельное топливо; 2 – керосин; 3 – бензин

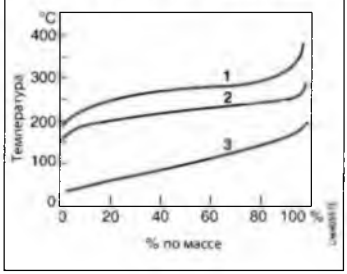
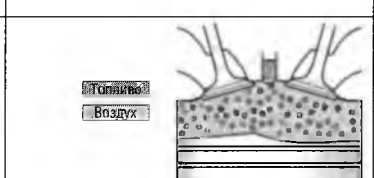
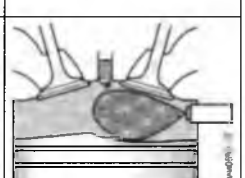


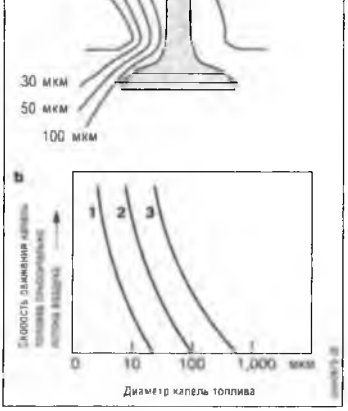
Таблица 1. Приготовление рабочей смеси в двигателях с искровым зажиганием

Приготовление рабочей смеси	Стехиометрическая смесь	Богатая смесь	Бедная смесь	Сверхбедная смесь	Работа двигателя при послойном распределении обедненной смеси
Смесеобразование	Гомогенное				Гетерогенное и гомогенное
Форма камеры сгорания					
Впрыск топлива	Впрыск топлива во впускной трубопровод и прямой впрыск				Прямой впрыск топлива
Зажигание	Внешний источник зажигания	Внешний источник зажигания	Внешний источник зажигания	Самовоспламенение	Внешний источник зажигания
Типичная степень сжатия	8…12		11…13	12…16	11 .14
Регулирование нагрузки двигателя	Количественное				Качественное
Рабочий диапазон	Весь диапазон рабочих условий	Полная нагрузка, диапазон высоких оборотов двигателя	Весь диапазон рабочих условий	Частичная нагрузка	Частичная нагрузка
Применение, стадия разработки	Обычные двигатели, серийное производство		Газовые двигатели, серийное производство	На стадии исследований	Новые процессы сжигания топлива

Динамика поведения сцепленной со стенками впускного трубопровода пленки и механизмы, действующие во время испарения, являются одними из главных причин неточного дозирования топлива, прежде всего во время работы двигателя в переходных режимах. Внутренней части цилиндра достигают только капли топлива малого размера, захваченные потоком воздуха (см. рис. 3). Типичный диаметр капель составляет 30 мкм. Ускорение капель пропорционально скорости движения капель относительно воздуха в зависимости от их диаметра.

Очень высокая степень турбулентности и высокие скорости потока дают очень хорошее смесеобразование. По мере развития процесса испаряются оставшиеся капли топлива малого размера. Топливо приобретает температуру смеси (см. рис. 4), и происходит гомогенизация смеси. За счет оптимальной конструкции камеры сгорания предотвращается интенсивный контакт топлива с ее стенками, всегда приводящий к риску конденсации.

Рис. 3. Образование капель топлива:
a – типичная ситуация в зазоре клапана;
b – взаимосвязь между диаметром капелек и их скоростью движения относительно воздушного потока,
1 – 0 %;
2 – 50 %;
3 – более 90 %



Прямой впрыск топлива

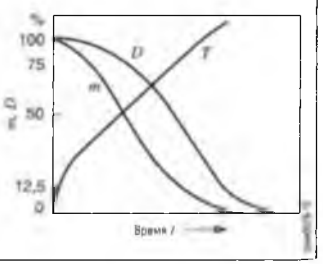
В системах прямого впрыска топлива (бензина) механизмы смесеобразования в зазоре клапана не используются. Поэтому здесь требуется более высокое давление впрыска, от 50 до 100 бар. Для обеспечения достаточного для гомогенизации времени впрыск производится не позже момента достижения поршнем нижней мертвой точки.

Затем впрыснутая смесь сжимается, в зависимости, прежде всего, от положения дроссельной заслонки и степени сжатия двигателя до уровня давления от 10 до 40 бар. Это соответствует уровню температуры от 300 до 500 °C, в зависимости, прежде всего, от степени сжатия. В гетерогенных процессах впрыск производится только в конце фазы сжатия.

Преимущество прямого впрыска топлива заключается в его точном дозировании. Процесс испарения топлива в камере сгорания также требует надлежащего охлаждения заряда топлива в цилиндре. Это позволяет повысить степень сжатия примерно на одну единицу, что дает повышение к.п.д. двигателя.

Во всех процессах сгорания окисление топлива происходит только в конце фазы сжатия и в начале фазы расширения.

Рис. 4. Испарение капель топлива:
m – масса; D – диаметр; T – температура испаряющейся капли;
m и D представлены в относительном виде. Масштаб T не указан, поскольку представлена только базовая характеристика



Процессы сгорания топлива в двигателях с искровым зажиганием

Последующий процесс сгорания топлива зависит от природы смесеобразования (гомогенной или гетерогенной). Полностью гомогенная смесь образуется в режиме предварительного смешивания, полностью гетерогенная смесь – в режиме контроля смесеобразования. На современных двигателях с прямым впрыском топлива и послойным распределением заряда топлива большая часть впрыскиваемого топлива (>50 %) гомогенизируется до начала сгорания.

Как при гомогенном, так и при частично гетерогенном смесеобразовании фактическому сгоранию топлива предшествует стадия зажигания.

Зажигание

Зажигание обычно осуществляется при помощи электродной свечи зажигания. При подаче высокого напряжения происходит электрический пробой с образованием искры между электродами свечи, зависящий от состояния смеси (т.е. ее давления, температуры и состава). Как правило, величина высокого напряжения составляет более 10 кВ. Требуемая величина высокого напряжения определяется прежде всего количеством молекул между электродами. Зажженная свечой зажигания смесь в процессе сгорания должна высвободить количество энергии, достаточное для зажигания смеси, непосредственно примыкающей к области начального зажигания. При обеднении смеси количество заключенной в ней энергии (при неизменном зазоре между электродами свечи) уменьшается. Это сопровождается увеличением потребности в энергии, необходимой для зажигания окружающей, также бедной смеси. Путем увеличения зазора между электродами можно увеличить объем смеси, поджигаемой свечой, и тем самым повысить величину энергии. Однако, увеличение зазора между электродами требует увеличения напряжения зажигания. Таким образом, эта потребность возрастает при обеднении смеси или при увеличении нагрузки. В случае увеличения нагрузки одновременно снижается продолжительность искры, в то время как требуемая величина высокого напряжения возрастает (см. рис. 5).

В связи с тепловыми потерями на электродах свечи, потерями на тепловую конвекцию и циклическими изменениями состояния смеси энергия зажигания превышает теоретическую минимальную энергию не более

Рис. 5. Продолжительность искры и требуемое напряжение зажигания:
a – продолжительность искры;
b – требуемое напряжение зажигания U_Z. Требуемое напряжение зажигания увеличивается при увеличении доли рециркулирующих отработавших газов или при обеднении смеси

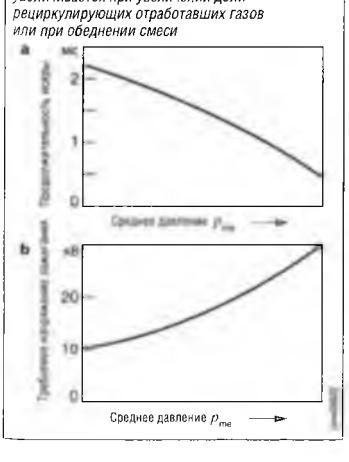
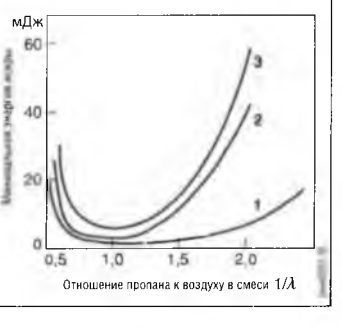


Рис. 6. Минимальная энергия искры для пропано-воздушной смеси
1 – энергия искры неподвижной смеси;
2 – энергия искры смеси со скоростью завихрения потока 6 м/с;
3 – энергия искры смеси со скоростью завихрения потока 15 м/с.
С увеличением содержания инертных газов требуемое напряжение зажигания возрастает для всех показанных состояний потока.



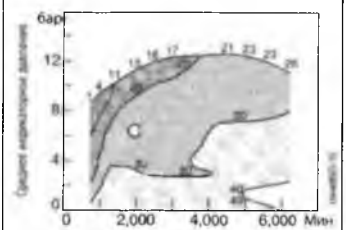
чем на один порядок величины (см. рис. 6). Стохастические изменения состояния между электродами (поля потока и состояния смеси) являются основной причиной значительных циклических изменений состояния на двигателях с искровым зажиганием. Эту ситуацию можно улучшить путем увеличения зазора между электродами. На современных двигателях эта величина уже составляет более 1 мм. Увеличение зазора между электродами вызывает необходимость в увеличении напряжения зажигания, что в свою очередь, приводит к повышенному износу электродов.

Целью зажигания является поджигание топливовоздушной смеси и, тем самым, инициация фактического процесса сгорания топлива. В зависимости скорости последующего сгорания топлива и скорости движения поршня (т.е. величины оборотов двигателя), момент зажигания должен соответствующим образом изменяться (см. рис. 7).

Процессы сгорания гомогенных смесей

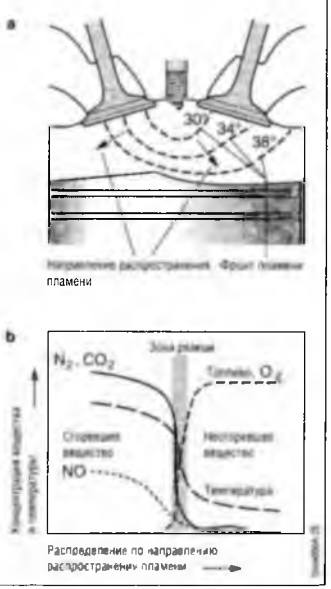
В двигателях с искровым зажиганием, работающих при гомогенном смесеобразовании, зажигание инициирует фактический процесс сгорания топлива. Пламя распространяется от свечи зажигания. При это можно определить скорость фронта пламени, равную сумме скоростей пламени и фронта пламени (движения заряда топлива, расширения, вызванного разностью плотностей). Для двигателей с искровым зажиганием, работающих при гомогенном смесеобразовании, поскольку пламя непрерывно распространяется наружу, можно провести различие между сгоревшей и несгоревшей смесью (см. рис. 8).

Рис. 7. Диаграмма момента зажигания:
Цифры указывают положение поршня в градусах до ВМТ (для двигателей с искровым зажиганием, работающих на гомогенной смеси)



Для того чтобы пламя достигло радиуса около одного сантиметра и беспрепятственно распространялось от углубления в поршне и головки цилиндра со скоростью, значительно превышающей 10 м/с, требуется несколько миллисекунд. Решающим фактором здесь является скорость распространения пламени, также называемая турбулентной скоростью пламени. Чем быстрее распространяется пламя, тем лучше происходит сгорание топлива внутри двигателя. Высокой скорости распространения пламени способствуют следующие факторы: низкое содержание инертных газов, повышение температуры несгоревшей смеси, повышение давления и высокий уровень турбулентности.

Рис. 8. Распространение пламени и сгорание предварительно перемешанной смеси:
a – распространение фронта пламени в бензиновом двигателе во время работы на гомогенной смеси (значения в градусах – сдвиг относительно точки зажигания);
b – распределение концентрации веществ и температур в направлении распространения пламени



Для большинства видов топлива максимальная скорость распространения пламени достигается при работе двигателя на несколько обогащенной смеси (λ = 0,85–0,9). Дополнительным преимуществом несколько обогащенной смеси является эффект охлаждения, обеспечиваемый избытком топлива. Поэтому двигатели спортивных и легковых автомобилей в диапазоне номинальных мощностей работают с несколько обогащенной смесью.

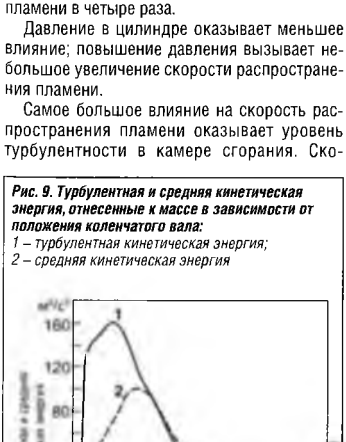
Увеличение содержания инертных газов снижает скорость распространения пламени. Практическим применением регулирования содержания инертных газов является система рециркуляции отработавших газов (EGR), в которой отработавшие газы с основными составляющими CO_2, H_2O и N_2 добавляются в топливовоздушную смесь. Существует эмпирическое правило, в соответствии с которым при степени рециркуляции 10 % скорость распространения пламени снижается на 20 %.

Причиной, по которой современные двигатели с искровым зажиганием, тем не менее, могут работать высокой степенью рециркуляции отработавших газов, является влияние температуры. Увеличение температуры в два раза повышает скорость распространения пламени в четыре раза.

Давление в цилиндре оказывает меньшее влияние; повышение давления вызывает небольшое увеличение скорости распространения пламени.

Самое большое влияние на скорость распространения пламени оказывает уровень турбулентности в камере сгорания. Скорость распространения пламени изменяется приблизительно пропорционально интенсивности турбулентности. Интенсивность турбулентности представляет собой меру высокочастотных колебаний скорости потока в данной точке камеры. Кинетическая энергия турбулентного потока пропорциональна квадрату интенсивности турбулентности.

Рис. 9. Турбулентная и средняя кинетическая энергия, отнесенные к массе в зависимости от положения коленчатого вала:
1 – турбулентная кинетическая энергия;
2 – средняя кинетическая энергия



Интенсивность турбулентности–это трехмерный количественный параметр, на величину которого влияет прежде всего профиль потока заряда топлива в камере сгорания. Скорость потока внутри камеры сгорания, линейно возрастающая до максимально возможной величины с увеличением величины оборотов двигателя, является чрезвычайно важным фактором. По мере увеличения скорости потока, возрастает и интенсивность турбулентности в камере сгорания. Благодаря этому двигатель стабильно работает в очень широком диапазоне оборотов коленчатого вала. В противном случае при повышении оборогов и неизменной скорости распространения пламени имели бы место нарушения в работе двигателя из-за уменьшения времени, имеющегося для сгорания. Однако, положительное влияние турбулентности не может полностью компенсировать влияние величины оборотов, поэтому при высоких оборотах процесс сгорания топлива чрезмерно растягивается и занимает более широкий диапазон угла поворота коленчатого вала. Это является дополнительной причиной снижения к.п.д. двигателей с искровым зажиганием при работе на высоких оборотах.

В двигателях с искровым зажиганием турбулентность в камере сгорания чрезвычайно важна для процессов преобразования энергии. Главным фактором, вызывающим турбулентность, является движение заряда топлива в цилиндре, на которое в основном влияют входной поток (зависящий от конфигурации впускных каналов в головке блока цилиндров) и форма камеры сгорания (см. рис. 9).

В процессе сгорания топлива происходит повышение давления, которое также может одновременно ощущаться. В целях повышения уровня комфорта следует принимать меры к сведению этого повышения давления к минимуму. Однако это противоречит получению высокого термодинамического к.п.д. двигателя. Максимально допустимый градиент повышения давления для двигателей с искровым зажиганием лежит в диапазоне от 0,5 до 3 бар/° угла поворота коленчатого вала.

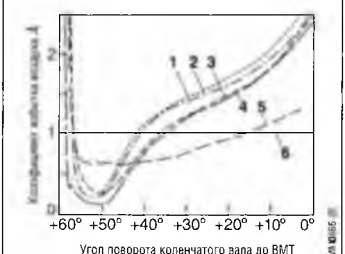
Сгорание частично гомогенных смесей

Современные двигатели с послойным распределением заряда топлива могут работать с избытком воздуха в смеси в диапазоне частичных нагрузок. При эффективном среднем давлении $p_{me} < 1$ бар возможна работа даже при значении $\lambda > 5$. Основное преимущество здесь заключается в улучшении цикла подачи заряда топлива в цилиндр, поскольку это позволяет в основном исключить дросселирование (которое оказывает негативное влияние на общий к.п.д.).

Нормальная работа невозможна без дросселирования в нижней части диапазона частичных нагрузок, поскольку гомогенные смеси, обедненные таким образом, сгорают значительно медленнее и, следовательно, неполностью. Решение заключается в локальной стратификации топлива в зоне расположения свечи зажигания посредством оптимизации впрыска топлива в конце фазы сжатия. Трудность здесь заключается в оптимальном согласовании процессов впрыска и зажигания, поскольку имеет место изменение условий между электродами (см. рис. 10).

Рис. 10. Изменение коэффициента избытка воздуха λ во времени в сферическом объеме (радиусом r) с центром в средней точке между электродами

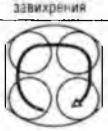
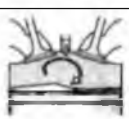
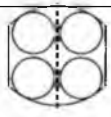
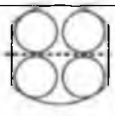
1 – процесс сгорания топлива в двигателях с послойным распределением заряда, λ в пределах r = 3 мм (газовое топливо);
2 – процесс сгорания топлива в двигателях с послойным распределением заряда, λ в пределах r = 3 мм (жидкое и газовое топливо);
3 – процесс сгорания топлива в двигателях с послойным распределением заряда, λ в пределах r = 5 мм (газовое топливо);
4 – процесс сгорания топлива в двигателях с послойным распределением заряда, λ в пределах r = 5 мм (жидкое и газовое топливо);
5 – оптимизированный процесс сгорания топлива в двигателях с послойным распределением заряда;
6 – процесс сгорания гомогенной смеси



Движение заряда топлива

Основными процессами во время подачи заряда топлива в цилиндр являются завихряющиеся и круговые потоки, имеющие диаметры, аналогичные характеристическим размерам камеры сгорания. Здесь основное различие проводится между потоками, движущимися вокруг вертикальной оси (оси цилиндра), называемыми горизонтальными завихрениями, и потоками, движущимися вокруг двух поперечных осей (оси коленчатого вала и перпендикулярной к ней оси), которые называются вертикальными завихрениями (см. табл. 2). В реальности имеет место перекрытие этих трех потоков, сопровождающееся образованием сложных трехмерных полей потока. Вертикальные и горизонтальные завихрения существенно различаются по своему поведению в двигателе.

Таблица 2. Цикл подачи заряда смеси в цилиндр и профиль потока

Приготовление рабочей смеси	Горизонтальный завихрений	Вертикальные завихрения	
Поток			
Направление оси потока	 Вертикальная ось *z*	 Поперечная ось *x*	 Поперечная ось *y*

Поток вертикального завихрения рассеивается до момента достижения верхней мертвой точки такта сжатия и в основном способствует распространению пламени в течение первой половины процесса сгорания топлива.

Поток горизонтального завихрения длится дольше и имеет место также в течение части последующей фазы расширения. Расщепление больших вертикальных завихрений на уменьшающиеся в размерах турбулентные потоки способствует созданию турбулентности. Однако, в дальнейшем вязкость рабочей среды становится причиной расщепления потока, что оказывает неблагоприятное влияние на скорость сгорания топлива.

Созданию турбулентности способствует специальная геометрия камеры сгорания. В частности, распространению пламени способствуют потоки в области углубления в поршне или в области вытеснения (см. [2]).

Одной из самых больших физических проблем, связанных с управлением процессами сгорания гомогенных смесей, является поведение процесса на стадии расширения, поскольку, как правило, свыше 10 % топлива в момент 30° после ВМТ остается не сгоревшим. В этот момент несгоревшая смесь все еще находится в непосредственной близости к стенкам цилиндра и еще должна сгорать после того, как она вновь выйдет из области гребня поршня над канавкой верхнего поршневого кольца (см. [2]). Это явление может стать причиной неполного сгорания топлива на заключительной стадии.

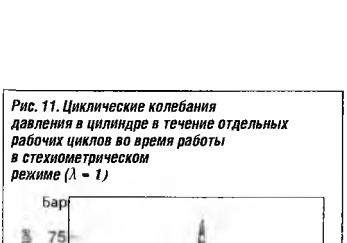


Рис. 11. Циклические колебания давления в цилиндре в течение отдельных рабочих циклов во время работы в стехиометрическом режиме ($\lambda = 1$)

Неконтролируемое сгорание топлива

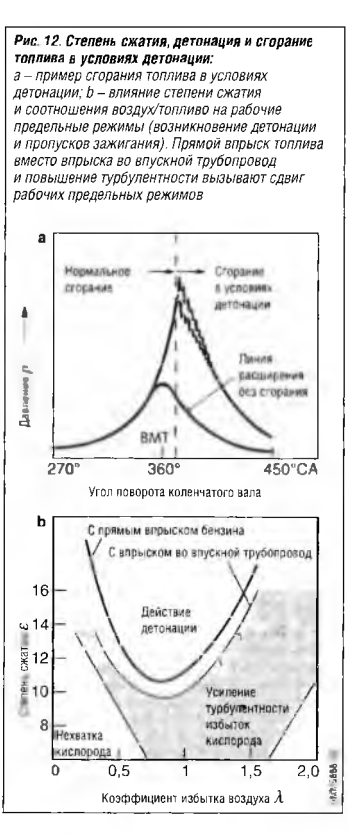
Многочисленные нежелательные процессы затрудняют достижение равномерного сгорания топлива. Кроме циклических изменений состояния, неблагоприятное влияние оказывают детонация и самовоспламенение. При этом могут иметь место крайние формы раннего зажигания, в особенности на современных двигателях с мощным турбонаддувом.

Циклические изменения состояния вызываются процессами сгорания предварительно приготовленной гомогенной смеси, которые весьма чувствительны к многочисленным возмущениям (см. рис. 11). Такими возмущениями являются, например, изменения состава смеси, остаточного содержания отработавших газов, термодинамических характеристик и профиля потока. Все эти значения варьируются от одного рабочего цикла к другому и вызывают заметные циклические колебания в процессе преобразования энергии. В частности, значительно повышает интенсивность этих циклических изменений обеднение смеси с избытком воздуха более 40 %. Самое большое влияние на циклические изменения состояния оказывает инициация зажигания.

Еще одну проблему представляет детонация. Здесь остаточная смесь вследствие возрастания температуры в процессе сгорания топлива достигает температуры зажигания и сгорает практически мгновенно, без дальнейшего контролируемого распространения пламени. Пульсации давления, генерируемые в ходе процесса, вызывают износ подшипников двигателя и в случае длительной работы двигателя в таком режиме могут привести к его серьезному повреждению. Повреждение компонентов также могут вызвать пиковые скачки температуры. Детонация возникает, как реакция на повышение температуры и давления после начала нормального сгорания топлива и продолжается до тех пор, пока локальные условия стимулируют самовоспламенение. Обычно детонация возникает в ходе рабочего цикла только в том случае, если 80 % количества топлива в камере сгорания остается несгоревшим. Детонацию особенно часто можно наблюдать при низких оборотах двигателя, когда имеется достаточное время для самовоспламенения смеси, и при больших нагрузках с высокими температурами в камере сгорания. Использование топлива с высокой температурой зажигания, например, метана или этана снижает

чувствительность к детонации. Детонацию также можно уменьшить, сдвинув момент зажигания в сторону запаздывания. Двигатели с высокой степенью сжатия и турбонаддувом более чувствительны к детонации в связи с более высокими температурами, достигаемыми в конце стадии сжатия. Эффективные меры по предотвращению детонации включают интенсивное охлаждение горячих областей цилиндра, в том числе за счет испарения бензина при прямом впрыске топлива, повышение турбулентности, уменьшение степени сжатия и оптимизацию топлива, например, при помощи тех или иных добавок.

Рис. 12. Степень сжатия, детонация и сгорание топлива в условиях детонации:
a – пример сгорания топлива в условиях детонации; b – влияние степени сжатия и соотношения воздух/топливо на рабочие предельные режимы (возникновение детонации и пропусков зажигания). Прямой впрыск топлива вместо впрыска во впускной трубопровод и повышение турбулентности вызывают сдвиг рабочих предельных режимов



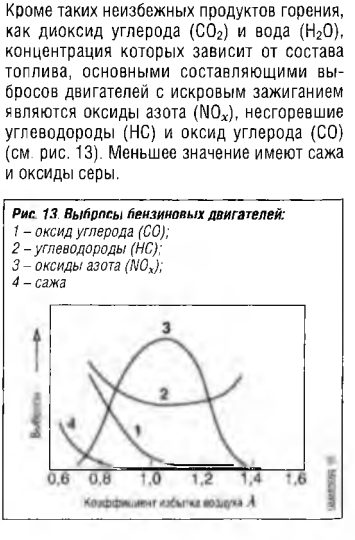
В отличие от детонации, самовоспламенение может возникать даже в условиях значительного запаздывания зажигания. Возможные причины самовоспламенения включают:
- чрезмерное запаздывание момента зажигания с неполным сгоранием смеси и образованием пленки топлива, способствующим самовоспламенению;
- работа двигателя с полной нагрузкой, с высокими температурами компонентов цилиндра;
- зажигание, вызываемое образивным износом и горячими частицами;
- выбросы масла вследствие износа поршневых колец

Крайние формы самовоспламенения могут возникать в бензиновых двигателях с высокой степенью сжатия и турбонаддувом. Они могут вызывать скачки давления свыше 150 бар, которые могут привести к серьезному повреждению двигателя. Однако такие экстремальные формы самовоспламенения возникают чрезвычайно редко и имеют вероятность менее 0,01 на тысячу.

Образование токсичных продуктов и снижение содержания токсичных продуктов в выбросах двигателей с искровым зажиганием

Кроме таких неизбежных продуктов горения, как диоксид углерода (CO_2) и вода (H_2O), концентрация которых зависит от состава топлива, основными составляющими выбросов двигателей с искровым зажиганием являются оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды (HC) и оксид углерода (CO) (см. рис. 13). Меньшее значение имеют сажа и оксиды серы.

Рис. 13. Выбросы бензиновых двигателей:
1 – оксид углерода (CO);
2 – углеводороды (HC);
3 – оксиды азота (NO_x);
4 – сажа



Для образования оксидов азота (NO_x) требуется наличие четырех факторов: кислорода, азота, высоких температур и времени. Поскольку содержание кислорода и азота определяется составом топлива, а время, необходимое для образования оксидов – величиной оборотов двигателя, снизить содержание оксидов азота в выбросах бензиновых двигателей можно только за счет снижения температуры в камере сгорания (например, путем сдвига момента зажигания в сторону запаздывания или за счет охлаждения путем рециркуляции отработавших газов).

Повышенное содержание в выбросах углеводородов (HC) и оксида углерода (CO) является результатом неполного сгорания смеси. Так, повышенное содержание HC и CO имеет место при работе двигателя на богатой смеси, в условиях недостатка кислорода. При работе на бедной смеси с соответствующим снижением температуры пламени имеет место более интенсивное затухание пламени, прежде всего вблизи стенок цилиндра, сопровождающееся увеличением содержания в выбросах HC. В то же время, за счет избытка кислорода имеет место снижение содержания CO.

Выброс сажи имеет место в двигателях, работающих на гомогенной смеси, только в случае очень сильного обогащения смеси. Содержание в выбросах соединений серы зависит от состава топлива.

Благодаря современным системам очистки отработавших газов, современные двигатели с искровым зажиганием, при условии достижения рабочей температуры каталитического нейтрализатора, становятся моторами, практически не дающими вредных выбросов. Трехступенчатые каталитические нейтрализаторы, работая при $\lambda = 1$, снижают выбросы оксидов азота, одновременно окисляя молекулы HC и CO. Работа двигателя на бедной смеси требует иного подхода. В этом случае на двигатели с послойным распределением заряда топлива, как правило, устанавливаются каталитические нейтрализаторы с нейтрализацией NO_x. Эти нейтрализаторы накапливают оксиды азота. Периодическая работа двигателя на обогащенной смеси при высоких температурах уменьшает количество накопленных оксидов азота. Поскольку каталитические нейтрализаторы с накоплением NO_x чувствительны к загрязнению соединениями серы, необходимо периодически выполнять циклы десульфатации, заключающиеся в работе двигателя на несколько обогащенной смеси при температурах свыше 600 °C.

Управление нагрузкой двигателей с искровым зажиганием

В двигателях с гомогенным зарядом топлива нагрузка регулируется путем изменения массы впрыскиваемого топлива. Соответствующий массовый расход воздуха, требуемый для работы при $\lambda = 1$, регулируется путем изменения положения дроссельной заслонки. Этот процесс известен под названием количественного контроля. При работе в диапазоне частичных нагрузок это вызывает индукционное дросселирование, оказывающее неблагоприятное влияние на общий к.п.д. двигателя. Этот недостаток может быть частично скомпенсирован за счет изменения синхронизации клапанов. Типичные меры включают опережение или запаздывание момента закрытия впускного клапана, уменьшение высоты подъема клапана или запаздывание момента закрытия выпускного клапана. В качестве альтернативной меры, с целью снижения дросселирования, возможно использование рециркуляции отработавших газов. На бензиновых двигателях с турбонаддувом скорость воздушного потока и, соответственно, массовый расход топлива регулируются в верхнем диапазоне нагрузок, как правило, путем изменения положения регулятора давления наддува на турбонагнетателе (см.«Турбонагнетатели отработавших газов»).

В двигателях с послойным зарядом топлива нагрузка регулируется путем изменения массы впрыскиваемого топлива. Это называется качественным контролем. Изменение состава топливовоздушной смеси по признаку однородности/неоднородности в диапазоне средних нагрузок требует сложных инженерных решений и увеличения расходов на разработки.

Выходная мощность и эффективность

При работе двигателей с искровым зажиганием в режиме частичной нагузки имеет место ухудшение рабочих характеристик в результате потерь в цикле подачи заряда (дросселирования), плохого управления процессом (пиковые давления ниже 30 бар) и повышения потерь трения в двигателе в этом диапазоне нагрузок. Поскольку даже при скоростях движения легковых автомобилей свыше 100 км/ч большинство двигателей продолжают работать в диапазоне частичных нагрузок, весьма успешными оказываются меры, направленные на повышение к.п.д. К таким мерам относятся:

- уменьшение рабочего объема;
- отключение цилиндра (например на двигателях V8 и V12);
- исключение дросселирования (применение систем с послойным распределением заряда топлива, рециркуляция отработавших газов, изменение синхронизации клапанов);
- увеличение степени сжатия;
- изменение передаточного отношения трансмиссии с целью снижения величины оборотов двигателя.

Дизельный двигатель

Отличительной особенностью дизельных двигателей является отсутствие внешних источников зажигания. Исключение необходимости в них достигается за счет впрыска способного к воспламенению топлива в сильно сжатый и, следовательно, горячий воздух. Высокие конечные значения давлений и температур, свыше 600 °C и 100 бар на двигателях с турбонаддувом обеспечивают чрезвычайно ровную работу двигателя. Образование струи топлива, испарение, смешивание и последующее сгорание топлива могут происходить в течение очень короткого периода времени.

Образование смеси

Процесс смесеобразования в основном определяется взаимодействием впрыскиваемой струи топлива с полем воздушного потока в камере сгорания. Здесь проблема заключается в быстром впрыске и приготовлении относительно больших масс топлива, до 200 мг на литр рабочего объема. Типичная продолжительность впрыска составляет около 1 мс. Термин, используемый в отношении массового расхода топлива, поступающего в камеру сгорания, – скорость впрыска (единица измерения: кг/с). Впрыск топлива, как правило, осуществляется форсунками с несколькими отверстиями.

Обычно используется комбинация отверстий диаметром от 120 до 150 мкм. Быстрому впрыску топлива и смесеобразованию способствуют малый диаметр отверстий и высокое давление впрыска, достигающее 2000 бар.

Вначале диаметр струи топлива равен диаметру отверстия. Однако, пройдя несколько миллиметров, струя распадается на отдельные капли, которые взаимодействуют с полем потока. Жидкая фаза струи топлива, в зависимости от плотности рабочей среды, может проникать в камеру сгорания на несколько сантиметров, прежде чем она будет полностью атомизирована или испарится (см. рис. 14).

Образованию капель топлива и его испарению способствует турбулентность. В современных дизельных двигателях более 80%

Рис. 14. Распространение струи топлива и смесеобразование в дизельных двигателях:
a – процесс проникания струи;
b – типичный процесс образования струи смеси (пограничные области бедной смеси с бесконечным значением λ находятся снаружи от непрерывной линии);
c – профиль скорости струи смеси

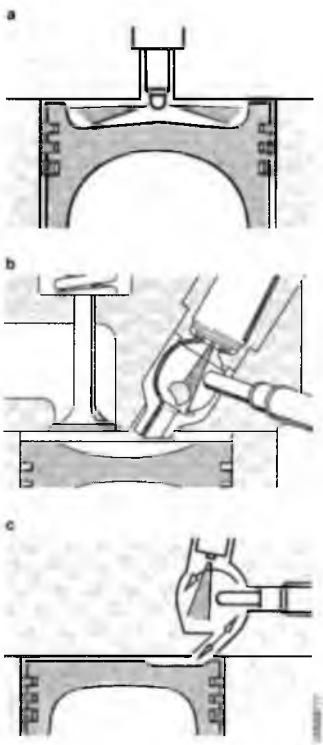


турбулентности в области образования струи топлива генерируется за счет впрыска топлива. Развитию турбулентности способствует движение заряда топлива, причем на дизельных двигателях с плоской головкой блока цилиндров преобладают горизонтальные завихрения. Дополнительный вклад могут вносить воздушные потоки, вызываемые сжатием, и направленные от наружной области камеры сгорания к внутренней ("потоки сжатия") или такая конструкция камеры сгорания, в которой, например, контакт с горячей областью углубления в поршне, способствующий испарению.

Системы прямого впрыска топлива за несколько последних десятилетий продемонстрировали свои преимущества по сравнению с системами непрямого впрыска, такими как системы с вихревой камерой или форкамерой. В системах с непрямым впрыском топлива подготовка топлива в основном осуществляется за счет формирования локального потока в предкамере.

Рис. 15. Процессы сгорания топлива в дизельных двигателях

Форма камеры сгорания и расположение форсунки для:
a – системы прямого впрыска топлива;
b – системы с форкамерой,
c – системы с завихрительной камерой

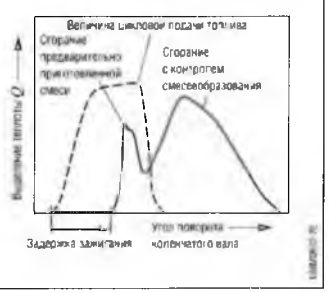


Процесс сгорания в дизельных двигателях

Процесс сгорания топлива в дизельном двигателе отличается от процесса в двигателе с искровым зажиганием степенью сжатия и зажиганием. В целом процесс сгорания топлива в дизельном двигателе можно описать как три последовательных процесса: задержка зажигания; сгорание предварительно приготовленной смеси и сгорание с контролем смесеобразования. В зависимости от рабочего состояния и диапазона эти процессы имеют различные временные составляющие (см. рис. 16).

Задержка зажигания относится к периоду времени между началом впрыска топлива и началом фактического процесса сгорания. В основном она определяется температурой в цилиндре, давлением в цилиндре и воспламеняемостью топлива. На стадии задержки зажигания проходят процессы смесеобразования и первых, предварительных химических реакций топливовоздушной смеси. Задержка зажигания увеличивается, когда двигатель не прогрет или при использовании топлива плохого качества с низким цетановым числом.

Рис. 16. Сгорание топлива в дизельном двигателе



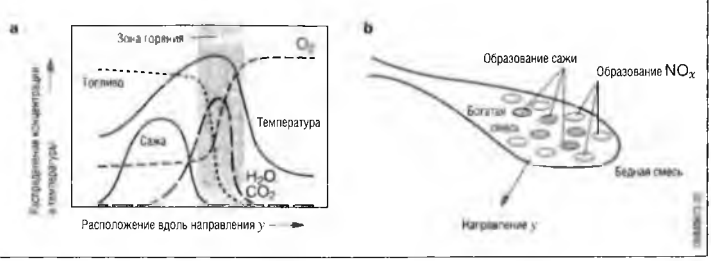
Влияние давления в цилиндре менее значительно, по сравнению с влиянием температуры. Однако, увеличение давления также несколько снижает величину задержки зажигания. Топливо, впрыснутое в течение задержки зажигания, пока что не сгорает. Величина задержки зажигания может составлять от 0,1 мс при работе двигателя в диапазоне номинальной выходной мощности до более 10 мс после пуска холодного двигателя.

Продолжительность задержки зажигания определяет процесс сгорания предварительно приготовленной смеси. Чем продолжительнее задержка зажигания, тем больше топлива смешивается в воспламеняемой форме. Эта масса топлива может превышать 20 мг на один литр рабочего объема. Горение, как правило, начинается на краю струи топлива, где топливо очень хорошо перемешано с воздухом, и следовательно, имеют место оптимальные для горения условия в отношении температуры и λ. В результате экзотермической реакции происходит местное повышение температуры до более чем 2300 К, которое быстро инициирует зажигание еще несгоревшего, предварительно смешанного с воздухом топлива. При этом скорость горения определяется происходящими химическими реакциями. Самоускоряющаяся цепная реакция вызывает чрезвычайно быстрое сгорание топлива с высокими градиентами возрастания давления. По этой причине масса предварительно смешанного, преобразованного топлива на дизельных двигателях должна быть как можно меньше. Это обычно достигается путем предварительного впрыска топлива, локальное сгорание которого вызывает начальное повышение температуры, снижающее эффект задержки зажигания топлива на стадии последующего основного впрыска.

Количество предварительно смешанного топлива может составлять от менее 1 % в диапазоне полной нагрузки до 100 % в диапазоне минимальной нагрузки. Остальное топливо сгорает в режиме контроля смеси. В отличие от сгорания предварительно смешанного топлива, во время сгорания в режиме контроля смеси, также называемого диффузионным сгоранием, скорость преобразования топлива определяется процессом переноса кислорода в зону горения. При этом трудно разделить зоны сгоревшего и несгоревшего топлива, поскольку четко определенный фронт пламени отсутствует. В основном диффузионное пламя устанавливается на краю струи, в ограниченном диапазоне, при $0{,}8 < \lambda < 1{,}4$. При изменении граничных условий (например, условий дальнейшего испарения топлива, переноса кислорода, контакта со стенками цилиндра) зона реакции также сдвигается в ту сторону, где преобладают локальные стехиометрические условия (см. рис. 17).

Сгорание в режиме контроля смеси преобладает в диапазоне высоких нагрузок, когда имеет место впрыск большого количества топлива. Здесь процессы смесеобразования и сгорания протекают параллельно. Так же как при сгорании предварительно смешанного топлива, на скорость преобразования может оказывать влияние процесс впрыска. Меньшее, однако также ускоряющее влияние оказывают повышение температуры и давле-

Рис. 17 Процесс сгорания в режиме контроля смеси:
a – распределение концентрации веществ и температуры;
b – образование загрязняющих веществ внутри впрыскиваемой струи



ния, а также снижение содержания инертных газов. Доминирующими факторами являются смесеобразование и перенос кислорода в зону горения за счет высокой локальной турбулентности.

По этой причине интенсивность турбулентности является определяющей переменной величиной в процессах сгорания топлива в дизельных двигателях. Турбулентность способствует созданию высоких давлений впрыска с высокой кинетической энергией струи топлива, которая в дальнейшем преобразуется в турбулентную кинетическую энергию. Локальная турбулентность вызывает быстрый перенос кислорода в локальные зоны реакций. Это явление также поддерживается движением заряда топлива в цилиндре (горизонтальные завихрения, потоки сжатия), однако основной вклад осуществляется импульсом впрыскиваемой струи топлива. Так же как повышение давления впрыска, можно рассмотреть целесообразность увеличения диаметра отверстий. Однако увеличение скорости впрыска приводит в основном к локальному переобогащению смеси, что отрицательно влияет на преобразование топлива.

Характеристики сгорания топлива в дизельных двигателях

Холодный пуск дизельных двигателей представляет собой особую проблему, в особенности при температурах наружного воздуха ниже –10 °С. При частоте проворота двигателя стартером менее 100 мин$^{-1}$ большая часть заряда топлива просачивается через поршневые кольца во время относительно медленной фазы сжатия. Кроме того низкая температура в цилиндре увеличивает тепловые потери через стенки. Результатом являются низкие пиковые давления (ниже 30 бар) и, в зависимости от температуры наружного воздуха, низкие пиковые температуры (ниже 400 °С).

Испарение топлива в положении верхней мертвой точки вызывает дальнейшее охлаждение. Это приводит к очень большим задержкам зажигания. В крайних случаях зажигание вообще может отсутствовать, и топливо может накапливаться в цилиндре на протяжении нескольких рабочих циклов. Его зажигание после нескольких рабочих циклов, вследствие большой массы накопленного топлива, может приводить к созданию очень больших пиковых давлений свыше 150 бар.

Поскольку фаза холодного пуска не обеспечивает времени, достаточного для надлежащего гидродинамического образования пленки смазочного масла в опорных точках коленчатого вала, это оказывает негативное влияние на механические системы двигателя. Отсюда следует, что облегчить процесс холодного пуска могут такие меры, как подогрев поступающего в двигатель воздуха, смазочного масла или охлаждающей жидкости. Последнее, так же как повышение температуры в камере сгорания, снижает трение в двигателе, что дает увеличение скорости проворота двигателя стартером.

С еще одним явлением приходится сталкиваться во время работы при очень высоких температурах наружного воздуха или на высоте более 1000 м над уровнем моря. Поскольку воздух имеет более низкую плотность, масса находящегося в цилиндре воздуха уменьшается. Вначале это не оказывает существенного влияния на процесс сгорания топлива. Однако, уменьшение количества избыточного воздуха вызывает повышение температуры отработавших газов.

Это явление также имеет место на двигателях с турбонаддувом. Поэтому необходимой мерой, прежде всего при работе на большой высоте, может быть снижение нагрузки.

По истечении периода приработки на дизельных двигателях наблюдается падение мощности порядка 1–3%. Причина этого заключается в системе впрыска топлива. Отложения нагара в топливных форсунках вызывают некоторое уменьшение диаметра отверстий форсунок, что приводит к снижению массового расхода и, следовательно, к потере мощности. Эти отложения могут быть вызваны, например, высоким содержанием в дизельном топливе меди, цинка или иных загрязняющих веществ.

Образование токсичных продуктов и снижение содержания токсичных продуктов в выбросах дизельных двигателей

В отличие от двигателей с искровым зажиганием, оборудуемых каталитическими нейтрализаторами отработавших газов, работающими при $\lambda = 1$, значительно снижающими количество выбросов, в отношении дизельных двигателей значительно большее значение имеет снижение образования токсичных продуктов в самом двигателе. Кроме продуктов горения топлива, присущих двигателям с искровым зажиганием, таким как CO_2, H_2O,

NO_x, HC и CO, следует также учитывать выбросы сажи и твердых частиц.

Для снижения содержания оксидов азота в выбросах полезны меры, направленные на снижение температуры сгорания топлива. Это может быть сделано посредством снижения концентрации кислорода в зоне горения. Температуру горения топлива также можно очень легко снизить, сдвинув момент зажигания в сторону запаздывания или снизив давление впрыска топлива.

Снижение давления впрыска топлива или концентрации кислорода, как правило, вызывает увеличение содержания в выбросах сажи. Образование сажи является сложным процессом, зависящим как от гидродинамических, так и термодинамических граничных условий. Вначале значительное количество сажи образуется в зонах локального обогащения смеси ($\lambda << 1$), однако в ходе последующих процессов сгорания топлива количество сажи уменьшается более чем на 70% за счет процессов окисления. Очень большое значение имеет высокий уровень турбулентности, способствующий окислению сажи на стадии расширения. Однако, важную роль играет также уровень температуры. В целом на процесс образования сажи оказывают влияние локальные взаимодействия между струей впрыскиваемого топлива, зоной горения, несгоревшей смесью, геометрией поршня и протеканием процесса сгорания топлива.

Содержание в выбросах оксидов азота снижают меры, направленные на снижение температуры, такие как рециркуляция отработавших газов, процессы Миллера (см. [2]) или частичная гомогенизация. Все это с избытком компенсирует наблюдаемое при этом увеличение содержания сажи (см. рис. 18). Уровень сложности и затрат, необходимых для снижения содержания обоих этих компонентов, весьма высок. В настоящее время все более широко применяется рециркуляция отработавших газов, для снижения содержания оксидов азота в сочетании с очень высокими давлениями впрыска (> 2000 бар).

В этом контексте следует различать выбросы сажи и выбросы твердых частиц. Сажа состоит из чистого углерода, в то время как твердые частицы также содержат капельки топлива или масла, частицы металла, продукты коррозии и сульфаты.

Соединения HC и CO обычно не имеют большого значения в отношении выбросов дизельных двигателей. Тем не менее, следует учитывать влияние на выбросы твердых частиц углеводородов. В частности, происходит увеличение концентрации HC и CO в случае значительного сдвига момента зажигания в сторону запаздывания, сопровождаемого неполным сгоранием топлива.

Рис. 18 Выбросы NO_x и сажи:
1 – кривая верхнего предела,
2 – кривая нижнего предела;
A – снижение содержания сажи и NO_x за счет: рециркуляции отработавших газов и повышения давления впрыска, частичной гомогенизации смеси и впрыска воды;
B – увеличение содержания сажи и снижение содержания NO_x в результате: запаздывания зажигания, снижения давления впрыска, снижения концентрации O_2 и применения процесса Миллера;
C – снижение содержания сажи и увеличение содержания NO_x в результате: опережения зажигания, повышения давления впрыска, увеличения концентрации O_2



Смешанные формы и альтернативные стратегии управления

Классическая стратегия управления дизельным двигателем характеризуется одним или более впрысками топлива в диапазоне ВМТ. Процессы сгорания топлива в двигателях с искровым зажиганием характеризуются гомогенным или частично гомогенным (послойным) смесеобразованием. В настоящее время разрабатываются альтернативные формы управления процессами, которые не могут быть однозначно связаны только с бензиновыми или только дизельными двигателями.

Воспламенение от сжатия гомогенного заряда топлива в дизельных двигателях

Что касается процессов HCCI (воспламенение от сжатия гомогенного заряда топлива), которым был посвящен ряд публикаций (например,[3]), целью является, посредством значительного опережения момента впрыска (как минимум 40–50° угол поворота коленчатого вала до ВМТ) достичь гомогенизации, значительного обеднения смеси и, следовательно, снижения содержания NO_x в выбросах. При этом надежное зажигание, тем не менее, будет иметь место, благодаря высокой температуре сжатия. В целях обеспечения контроля процесса сгорания степень сжатия должна быть снижена до 14–16. Для повышения температуры в цилиндре при низких нагрузках обычно используется рециркуляция отработавших газов. Тем не менее, получить оптимальные условия во всем диапазоне условий, в особенности в диапазоне высоких нагрузок достаточно трудно, поскольку при этом становятся очень высокими градиенты возрастания давления, и управление работой двигателя в переходных режимах становится очень сложной задачей ввиду большого количества всех возможных состояний двигателя.

Воспламенение от сжатия в двигателях с искровым зажиганием

Процессы сгорания топлива в двигателях с искровым зажиганием были исследованы в отношении возможности использования режима HCCI, аналогично дизельным двигателям, с целью достижения недросселированного обеднения смеси в диапазоне частичных нагрузок, что дает снижение расхода топлива по сравнению с двигателями, работающими в обычном стехиометрическом режиме. Недостатки работы на обедненной смеси в отношении процессов преобразования в каталитическом нейтрализаторе компенсируются чрезвычайно низким содержанием необработанных оксидов азота NO_x, благодаря обеднению смеси. Надежное зажигание трудновоспламеняемой смеси достигается за счет высокой степени сжатия – свыше 13. Оптимальная степень сжатия является переменной величиной и может быть снижена за счет повышения температуры в камеры сгорания.

Двигатели с искровым зажиганием с послойным распределением заряда топлива

Процессы сгорания топлива в двигателях с искровым зажиганием с прямым впрыском топлива и послойным распределением заряда топлива имеют много общего с процессами в дизельных двигателях и, следовательно, представляют собой смешанную форму процессов, имеющих место в обычных двигателях с искровым зажиганием и дизельных двигателях. Процессы сгорания топлива этого типа находят все более широкое применение, благодаря их более высокой эффективности в диапазоне частичных нагрузок, достигаемой за счет исключения дросселирования.

Многотопливные двигатели

Многотопливные двигатели, характеризующиеся возможностью использования различных видов топлива, в настоящее время не играют важной роли в связи с невозможностью выполнения требований в отношении содержания вредных продуктов в отработавших газах.

Список литературы

[1] Oertel, H.; Bohle, M.; Dohrmann, U.: Stromungsmechanik. 5th Ed., Vieweg+Teubner, 2008.

[2] v. Basshuysen, R.; Schafer, F. (редакторы): Handbuch Verbrennungsmotor, 4th Ed., Vieweg+Teubner, 2007.

[3] Boulouchos, K.: Strategies for Future Combustion Systems – Homogeneous or Stratified Charge? SAE 2000-01-0650.

Цикл подачи заряда смеси в цилиндр и наддув

Газообмен

В двигателях внутреннего сгорания газообмен выполняет две основные функции:
- удаление из цилиндра двигателя отработавших в предыдущем цикле газов;
- обеспечение поступления кислорода, необходимого для горения топлива, в виде свежего воздуха.

Для оценки процесса теплообмена можно использовать параметры, определенные в стандарте DIN 1940 [1]. Для общего расхода воздуха $\lambda_a = m_g/m_t$ общий заряд топлива m_g, перенесенный в течение рабочего цикла, определяется относительно теоретического максимума m_t для данного рабочего объема цилиндра. В отличие от него, коэффициент наполнения цилиндра зарядом $\lambda_{a1} = m_z/m_t$ определяется исключительно, исходя из величины свежего заряда m_z, фактически присутствующего или оставшегося в цилиндре. Разность между этой величиной и величиной общего перенесенного заряда m_g представляет собой часть газа, поступающего прямо в выпускной тракт на стадии перекрытия и, следовательно, недоступную для последующего сгорания.

Степень удержания $\lambda_s = m_z/m_g$ является показателем величины остаточного заряда в цилиндре.

Эффективность очистки $\lambda_S = m_z/(m_z + m_r)$ показывает объем свежего заряда m_z относительно общего заряда, состоящего из свежего заряда и остаточного газа m_r. Здесь параметр m_r показывает количество газа, оставшегося от предыдущих рабочих циклов по окончании процесса выпуска.

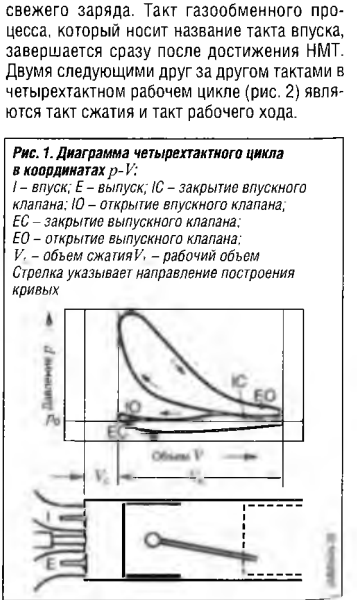
В двигателе с двухтактным рабочим циклом газообмен осуществляется за каждый оборот коленчатого вала; в двигателе с четырехтактным рабочим циклом – за два оборота.

Четырехтактный рабочий цикл двигателя

Фазы газораспределения и, таким образом, газообмен регулируются посредством распределительного вала. Последний вращается с частотой в два раза меньшей, чем коленчатый вал двигателя, от которого распределительный вал приводится. При вращении распределительный вал открывает клапаны, преодолевая усилия клапанных пружин; это обеспечивает впуск свежего заряда и выпуск отработавших газов (соответственно через впускные и выпускные клапаны) (см. рис. 1). Перед подходом поршня к НМТ выпускной клапан открывается и около 50 % по объему продуктов сгорания выводится из цилиндра под действием большого давления, созданного во время предшествующего такту выпуска такта рабочего хода. По мере перемещения поршня вверх во время такта выпуска он выталкивает почти все оставшиеся продукты сгорания.

Непосредственно перед тем, как поршень достигнет ВМТ, и перед закрытием выпускного клапана начинает открываться впускной клапан. Это положение носит название «перекрытие клапанов». После ВМТ выпускной клапан закрывается при еще открытом впускном клапане; поршень при этом перемещается вниз и обеспечивает всасывание свежего заряда. Такт газообменного процесса, который носит название такта впуска, завершается сразу после достижения НМТ. Двумя следующими друг за другом тактами в четырехтактном рабочем цикле (рис. 2) являются такт сжатия и такт рабочего хода.

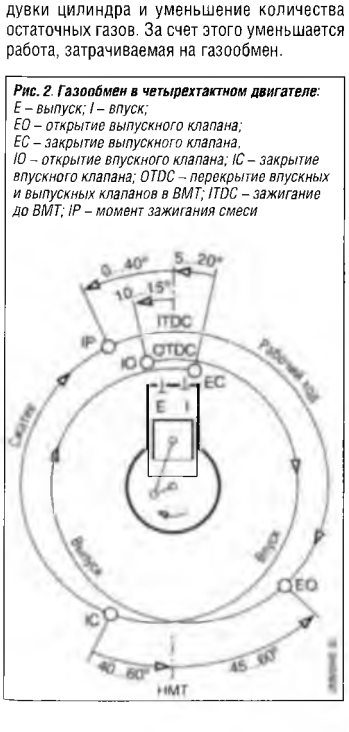
Рис. 1. Диаграмма четырехтактного цикла в координатах p–V:
I – впуск; E – выпуск; IC – закрытие впускного клапана; IO – открытие впускного клапана; EC – закрытие выпускного клапана; EO – открытие выпускного клапана; V_c – объем сжатия V_t – рабочий объем
Стрелка указывает направление построения кривых



На двигателях с искровым зажиганием с дроссельной заслонкой во время перекрытия клапанов происходит заброс отработавших газов из камеры сгорания во впускной трубопровод или из выпускного тракта обратно в камеру сгорания, а оттуда во впускной коллектор. Эта внутренняя рециркуляция отработавших газов вызывает повышение температуры в камере сгорания и содержание инертных газов в цилиндре. Следствием этого является неоптимальное использование мощности двигателя в диапазоне высоких нагрузок. При данной установке фаз газораспределения важно обеспечить компромисс, который, прежде всего для двигателей с искровым зажиганием, определяется согласованием стратегии управления двигателем с работой турбонагнетеля.

При раннем открытии выпускного клапана обеспечивается достаточное время для продувки цилиндра и уменьшение количества остаточных газов. За счет этого уменьшается работа, затрачиваемая на газообмен.

Рис. 2. Газообмен в четырехтактном двигателе:
E – выпуск; I – впуск;
EO – открытие выпускного клапана;
EC – закрытие выпускного клапана;
IO – открытие впускного клапана; IC – закрытие впускного клапана; OTDC – перекрытие впускных и выпускных клапанов в ВМТ; ITDC – зажигание до ВМТ; IP – момент зажигания смеси



Момент закрытия впускного клапана оказывает наибольшее влияние на зависимость расхода воздуха от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Максимальный коэффициент наполнения цилиндра зарядом достигается при низких частотах вращения, когда впускной клапан закрывается раньше, и при высоких частотах вращения, когда он закрывается позднее.

Обычно фазы газораспределения представляют компромисс между двумя конструкторскими требованиями: получением максимального среднего эффективного давления (и, таким образом, крутящего момента) и получением максимальной мощности. При более высоких частотах вращения коленчатого вала, соответствующих максимальной мощности, и при более широком скоростном диапазоне работы двигателя сохранить указанный компромисс крайне трудно. Эту тенденцию невозможно нейтрализовать, в том числе и при помощи головок цилиндра с несколькими клапанами, с увеличенной площадью сечения впускного канала.

В тоже время требования к минимальному содержанию вредных выбросов в отработавших газах и к максимальному снижению расхода топлива означают, что все более важным становится обеспечение низких оборотов холостого хода и высокого крутящего момента (в сочетании с высокой удельной мощностью на единицу веса). Эти требования вызывают необходимость в применении регулирования фаз газораспределения.

Преимуществом четырехтактного цикла являются высокий коэффициент наполнения цилиндра зарядом двигателя во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала, низкая чувствительность к падению давления в выпускной системе, возможность влияния на кривую наполнения подбором фаз газораспределения и конструкцией впускной системы.

Недостатками четырехтактного цикла являются сложность механизма газораспределения и низкая удельная мощность четырехтактных двигателей без турбонаддува, поскольку для выработки полезной выходной мощности используется только каждый второй оборот коленчатого вала.

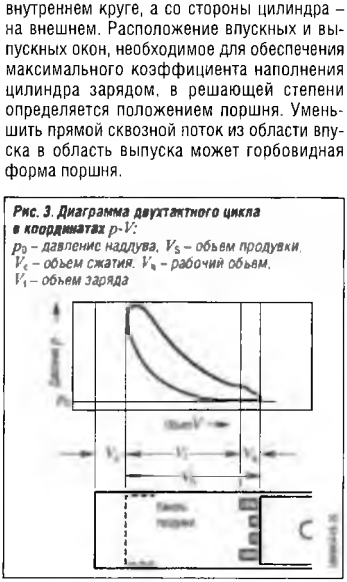
Двухтактный цикл работы двигателя

В двухтактном цикле газообмен должен происходить в конце такта расширения и в начале такта сжатия. Продолжительность впу-

ска и выпуска обычно определяется самим поршнем, когда он при перемещении вверх после НМТ последовательно перекрывает впускные и выпускные окна в стенке цилиндра (рис. 4). Однако, такая конфигурация требует симметричных значений времени управления и создает проблему прямого переноса свежей смеси в область выпуска. Кроме того, 15...25% рабочего объема вообще не используется для производства работы, а для этой цели используется только объем заряда V_1 (рис. 3).

Так как в двухтактном цикле отдельные такты впуска и выпуска отсутствуют, цилиндр должен заполняться воздухом и продуваться принудительно под давлением с помощью продувочного насоса. В наиболее часто встречающейся конструкции двигателя с кривошипно-камерной продувкой (см. рисунок внизу справа) используется в качестве продувочного насоса полость картера. На рис. 4 показан двухтактный двигатель с продувкой картера и предварительным сжатием, вместе с соответствующими процессами управления. Процессы, имеющие место со стороны кривошипной камеры, показаны на внутреннем круге, а со стороны цилиндра – на внешнем. Расположение впускных и выпускных окон, необходимое для обеспечения максимального коэффициента наполнения цилиндра зарядом, в решающей степени определяется положением поршня. Уменьшить прямой сквозной поток из области впуска в область выпуска может горбовидная форма поршня.

Рис. 3. Диаграмма двухтактного цикла в координатах p-V:
p_0 – давление надува, V_S – объем продувки, V_c – объем сжатия, V_h – рабочий объем, V_1 – объем заряда



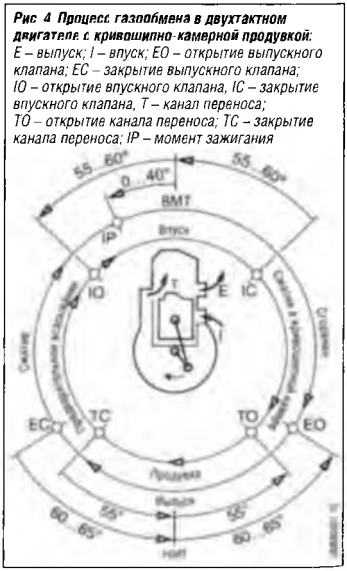
Преимуществами двухтактного цикла работы двигателя являются высокая выходная мощность на единицу веса и рабочего объема двигателя и более равномерное создание крутящего момента (один рабочий ход на один оборот).

Недостатками двухтактного цикла работы двигателя являются более высокий расход топлива, низкое среднее давление (вследствие меньшей массы заряда топлива), более высокие тепловые нагрузки (вследствие отсутствия рабочего хода газообмена), затрудненный контроль состава смеси и более высокое содержание углеводородов в выбросах вследствие худших условий продувки цилиндра. К настоящему времени двухтактные циклы перестали играть заметной роли в связи с вступлением в силу строгих требований к ограничению содержания вредных веществ в выбросах двигателей.

Регулирование фаз газораспределения

Регулирование фаз газораспределения находит все более широкое применение и имеет различные цели. Эти цели включают сле-

Рис. 4 Процесс газообмена в двухтактном двигателе с кривошипно-камерной продувкой:
E – выпуск; I – впуск; EO – открытие выпускного клапана; EC – закрытие выпускного клапана; IO – открытие впускного клапана, IC – закрытие впускного клапана, T – канал переноса; TO – открытие канала переноса; TC – закрытие канала переноса; IP – момент зажигания



дующее: увеличение мощности и крутящего момента; предотвращение дросселирования; контроль содержания остаточных отработавших газов; отключение цилиндра; контроль движения заряда топлива; облегчение холодного пуска двигателя и оптимизация процессов управления (например, массой заряда, содержанием остаточных отработавших газов), оказывающих влияние на скорость вращения турбонагнетателя отработавших газов; регулирование температуры отработавших газов.

В настоящее время применяются различные системы регулирования фаз газораспределения. Их мотивация различна в зависимости от процессов сгорания топлива и концепции двигателя (с гомогенным смесеобразованием или с послойным распределением заряда топлива).

Регулирование распределительного вала

Концепция регулирования впускного и выпускного распределительных валов приобретает все большую популярность, предлагая высокую степень гибкости во всем диапазоне режимов работы двигателя. Эта концепция заключается в регулировании положения распределительных валов относительно положения коленчатого вала, тем самым в сдвигании фаз газораспределения с сохранением той же формы открытия/закрытия клапанов. В настоящее время в системах регулирования фаз газораспределения находят применение электрические или электрогидравлические исполнительные устройства.

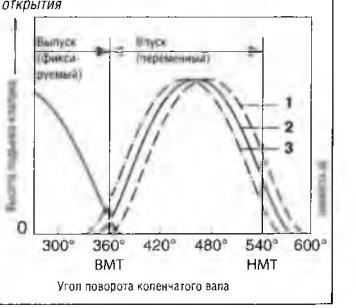
В двигателях с искровым зажиганием, работающих на гомогенной смеси, впускной распределительный вал смещен в сторону запаздывания, например, в диапазоне низких частот вращения и нагрузок. В то же время выпускной распределительный вал смещен в сторону очень раннего закрытия клапанов (рис. 5). Это минимальное перекрытие клапанов сводит к минимуму сквозной поток свежей смеси в область выпуска. В то же время значительное запаздывание открытия впускного клапана также вызывает снятие дросселирования за счет соответствующего позднего закрытия впускного клапана, поскольку заряд смеси в цилиндре снова выпускается через впускной клапан после прохождения нижней мертвой точки. Для данной точки диапазона нагрузки, посредством сдвига впускного распределительного вала, можно получить быстрое увеличение крутящего момента

Регулирование положения выпускного распределительного вала также дает дополнительные степени свободы Оптимальная регулировка впускного и выпускного распределительных валов зависит от большого количества факторов. Главными из них являются режим работы и положение рабочей точки. Например, важное значение имеет турбонаддув отработавших газов или режим работы на бедной смеси (на дизельных двигателях, двигателях с искровым зажиганием с послойным распределением заряда топлива и т.д.). Примером положительного эффекта системы регулирования фаз газораспределения в сочетании с турбонагнетателем отработавших газов является зависимое от характеристики двигателя максимальное перекрытие клапанов (очень позднее закрытие выпускного клапана и очень раннее закрытие впускного клапана), при котором большая часть смеси направляется прямо из области впуска в область выпуска. Это может дать положительный эффект увеличения массы воздушного потока, создаваемого турбонагнетателем отработавших газов, а также его скорости Регулирование положения впускного и выпускного распределительных валов дает возможность оптимизации различных процессов и поэтому все более широко применяется на современных двигателях с искровым зажиганием.

Системы с механизмом контроля формы кулачков

Кроме систем регулирования фаз газораспределения находят применение более простые системы, в которых в цифровой форме осуществляется адаптация к различным формам

Рис. 5. Способ регулировки фаз впускных клапанов путем поворота распределительного вала на определенный угол:
1 – запаздывание открытия впускного клапана; 2 – исходный момент открытия; 3 – опережение открытия



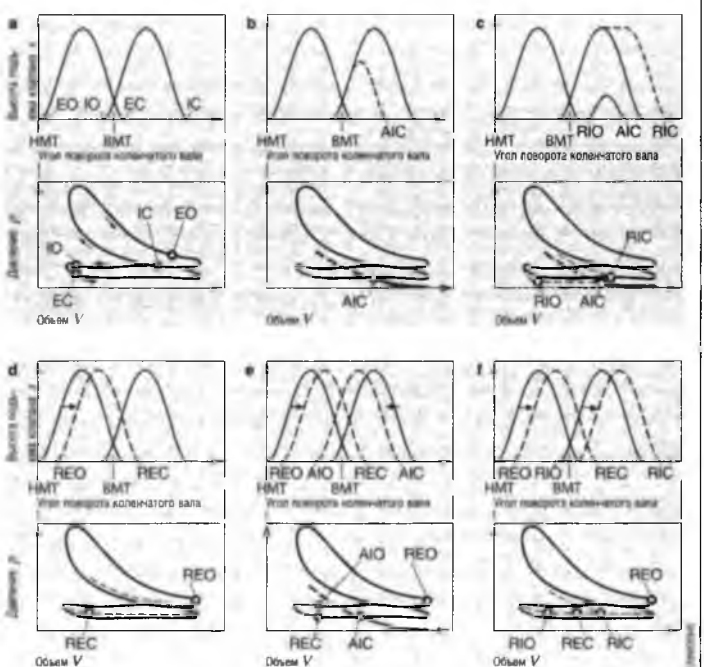
кулачков распределительных валов. Обычно такие системы обеспечивают большую величину подъема клапанов при полной нагрузке и малую величину подъема в диапазоне частичных нагрузок. Это достигается за счет установки на коромысле или толкателе клапана исполнительного механизма, который приводит в действие один или более (обычно два) кулачка на распределительном вале.

Также применяются системы, контролирующие только два положения распределительного вала. В отличие от полностью регулируемых систем, эти системы, игнорируют команду точного позиционирования, поступающую на регулятор фазы распределительного вала.

Прочие регулируемые системы

В настоящее время все более быстрыми темпами ведется разработка новых, полностью регулируемых систем для двигателей с искровым зажиганием, некоторые из которых уже нашли применение на серийно выпускаемых

Рис. 6. Влияние установки фаз газораспределения на рабочий цикл:
a – стандартная установка фаз газораспределения b – раннее закрытие впускного клапана c – уменьшение подъема клапана и позднее закрытие впускного клапана d – позднее закрытие выпускного клапана; e – позднее закрытие выпускного клапана раннее закрытие впускного клапана f – позднее закрытие выпускного и впускного клапанов
IO – открытие впускного клапана, EO – открытие выпускного клапана; IC – закрытие впускного клапана; EC – закрытие выпускного клапана;
A – опережение; R – запаздывание



автомобилях. Эти системы фокусируются на оптимизации фаз цикла газораспределения. В зависимости от конфигурации двигателя и режима работы применяются те или иные технические решения, каждое из которых направлено на оптимизацию потерь цикла, содержания остаточных отработавших газов или мощности двигателя (рис. 6).

Для создания полностью регулируемых клапанных механизмов могут быть использованы механические, электрогидравлические или электропневматические системы.

Рис. 7. Кривые подъема клапана на механическом, полностью регулируемом клапанном механизме

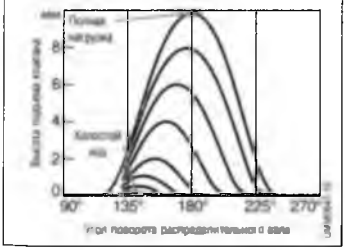
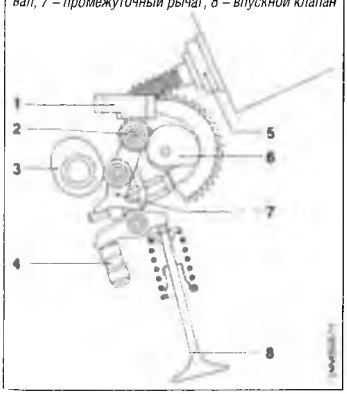


Рис. 8. Принцип действия механического, полностью регулируемого клапанного механизма (BMW Valvetronic):
1 – направляющий блок; 2 – центр вращения; 3 – коленчатый вал; 4 – гидравлический компенсатор зазора клапана; 5 – сервоблок с червячным зубчатым колесом; 6 – эксцентриковый вал; 7 – промежуточный рычаг; 8 – впускной клапан



Механические системы

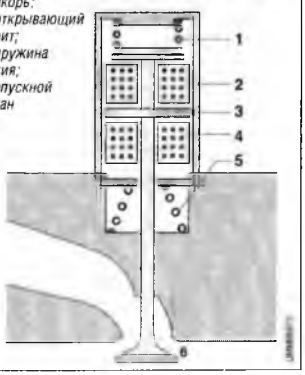
Механические полностью регулируемые клапанные механизмы обычно включают комбинацию регулятора, позволяющего изменять высоту подъема клапана, и регулятора фазы распределительного вала. Основной функцией является регулирование высоты подъема клапана.

В этом случае приемлемое решение заключается в использовании обычного распределительного вала, который, однако, не воздействует непосредственно на клапан через коромысло или толкатель. Высота подъема клапана регулируется при помощи промежуточного рычага, положение оси поворота которого может изменяться при помощи эксцентрикового вала (рис. 7 и 8). Обычно для привода таких систем используются электродвигатели постоянного тока. Примером полностью регулируемого клапанного механизма является система BMW Valvetronic [2]. Дополнительными преимуществами полностью регулируемого клапанного механизма являются оптимизация распределения заряда топлива и потенциал увеличения скорости движения заряда за счет применения двух впускных клапанов, открывающихся в диапазоне низких нагрузок в различные моменты времени за счет несколько различающихся эксцентриситетов.

Электромеханические системы

Электромеханические системы (электромеханические клапанные механизмы) находятся на стадии разработки. В электро-

Рис. 9. Электромеханическая система:
1 – пружина сжатия; 2 – закрывающий магнит; 3 – якорь; 4 – открывающий магнит; 5 – пружина сжатия; 6 – впускной клапан



механическом клапанном механизме для регулирования фаз газораспределения в качестве исполнительных устройств используются электромагниты (рис. 9, см. также [3]). Следует отметить, что такие системы отличаются большим потребляемым электрическим током. В целях снижения потребляемой мощности система, состоящая из клапана, катушки и магнита, делается резонансной. В связи с высокой потребляемой мощностью и сложностью электромагнитные клапанные механизмы на серийно выпускаемых автомобилях пока что не применяются.

Электрогидравлические системы

Электрогидравлические системы (электрогидравлические системы регулирования фаз газораспределения) являются альтернативой для полностью регулируемых механических клапанных механизмов. В этом случае применяются иные принципы.

Эффективным подходом является принцип «потерянного движения». Движение передается на клапан от распределительного вала через промежуточный гидравлический элемент (рис. 10). Наличие электромагнитного гидравлического клапана дает возможность неполной передачи движения кулачка. Поэтому форма огибающей обусловлена формой кулачка (рис. 11).

Альтернатива представлена системой, в которой воздействие на клапаны осуществляется при помощи гидроаккумулятора и клапанов с электронной системой управления. Системы этого типа находятся на стадии разработки и на серийно выпускаемых автомобилях пока что не применяются.

В зависимости от режима работы и продолжительности активации имеет место утечка части гидравлической жидкости через гидравлический клапан. Такие потери гидравлической энергии являются недостатком этой системы.

Электрогидравлические системы с 2004 года применяются на двигателях машин компании Caterpillar, а с 2010 года – на некоторых моделях компании Fiat (система MultiAir).

Электропневматические системы

Электропневматические системы пока что находятся на стадии разработки. В настоящее время применения таких систем в серийном производстве не предвидится. Кроме сложной системы управления для таких систем требуется источник пневматической энергии. В настоящее время такие системы используются в исследовательских

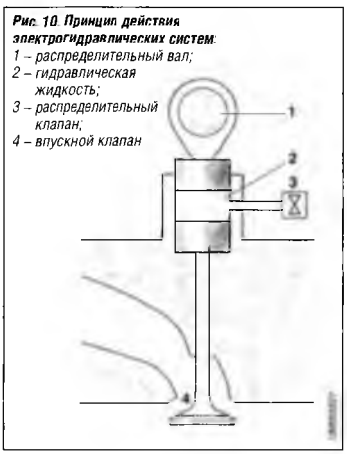


Рис. 10. Принцип действия электрогидравлических систем:
1 – распределительный вал;
2 – гидравлическая жидкость;
3 – распределительный клапан;
4 – впускной клапан

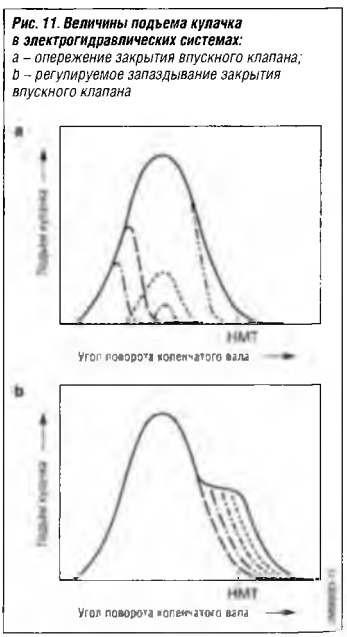


Рис. 11. Величины подъема кулачка в электрогидравлических системах:
a – опережение закрытия впускного клапана;
b – регулируемое запаздывание закрытия впускного клапана

целях. Мощность, потребляемая источником сжатого воздуха, должна быть обязательно включена в баланс к.п.д.

Процессы наддува

Мощность двигателя пропорциональна массовому расходу воздуха, который, в свою очередь, пропорционален плотности воздуха. Рабочий объем и частота вращения коленчатого вала двигателя могут быть увеличены за счет предварительного сжатия воздуха перед поступлением его в цилиндры двигателя, т.е. путем так называемого наддува. Коэффициент наддува соответствует увеличению плотности нагнетаемого воздуха по сравнению с атмосферным давлением (в двигателях без наддува воздух поступает под атмосферным давлением).

С точки зрения термодинамики наилучшие результаты могли бы быть получены в процессе изотермического сжатия, однако это технически недостижимо. На практике оптимальным процессом является адиабатическое сжатие; при этом увеличение плотности воздуха сопровождается потерями.

Коэффициент наддува в бензиновых двигателях ограничивается возникновением детонации, а в дизельных двигателях – максимально допустимым пиковым давлением в цилиндре. Поэтому двигатели с наддувом обычно имеют более низкие степени сжатия, чем двигатели без наддува той же мощности.

Динамический наддув

На процессы газобмена оказывает влияние не только установка фаз газораспределения, но и геометрия впускных и выпускных каналов. Движение поршня на такте всасывания при открытии впускного клапана создает волну всасывания, которая отражается от открытого конца впускного трубопровода и возвращается к впускному клапану в виде волны давления. Эти волны давления могут быть использованы для увеличения массового расхода воздуха на впуске. Кроме геометрии впускного трубопровода интенсивность этого эффекта наддува, основанного на газодинамике, также зависит от величины оборотов двигателя.

Инерционный наддув

В системах инерционного наддува каждый цилиндр снабжен отдельным впускным каналом определенной длины, обычно соединяющимся с общей камерой. По этим впускным каналам волны давления могут распространяться независимо друг от друга (рис. 12). Длины отдельных впускных каналов адаптированы к установке фаз газораспределения таким образом, чтобы в желаемом диапазоне оборотов двигателя за счет волны давления, проходящей через открытый впускной клапан, достигалось увеличение массы заряда.

В то время как длина каналов должна быть адаптирована к диапазону оборотов двигателя, диаметры каналов должны быть согласованы с рабочим объемом цилиндра. В системе впуска, показанной на рис. 13, возможно переключение между двумя системами каналов различной длины. Переключающий клапан или заслонка закрывается в нижнем диапазоне оборотов двигателя, и всасываемый воздух поступает в цилиндры через более длинные впускные трубопроводы. При высоких оборотах переключающий клапан открыт, и воздух поступает через короткий впускной трубопровод.

Наддув с использованием специально настроенных впускных каналов (резонансный наддув)

При определенных оборотах двигателя возникает резонанс колебаний газа во впускном трубопроводе, вызванных возвратно-поступательным движением поршня, что создает дополнительный эффект наддува.

При таком варианте наддува короткие трубопроводы соединяют группы цилиндров двигателя с резонансными ресиверами с такими же интервалами, как промежутки между

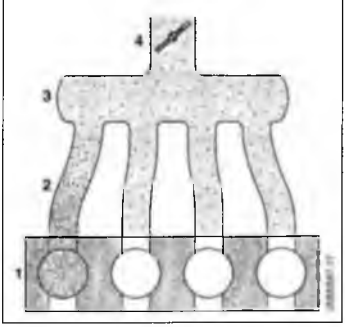


Рис. 12. Инерционный наддув (принцип):
1 – цилиндр; 2 – индивидуальный канал; 3 – общая камера, 4 – дроссельная заслонка (дроссельный клапан)

вспышками в цилиндрах (рис. 14). Эти рессиверы сообщаются с атмосферой или общей камерой посредством специально отрегулированных трубок и резонаторов Гельмгольца [4] Длина и диаметр трубопроводов определяются диапазоном оборотов двигателя, в котором должен возникать эффект дополнительного резонансного наддува (рис. 15).

Впускные трубопроводы с изменяемой геометрией

Поскольку эффект динамического наддува зависит от режима работы (величины оборотов) двигателя, изменяемая геометрия впускного трубопровода позволяет получить практически идеальную кривую крутящего момента. Регулируемые системы могут быть реализованы посредством изменения длины впускных каналов за счет переключения между системами каналов различной длины или диаметра, попеременного перекрытия отдельных каналов в системах с несколькими наборами впускных каналов или переключения между различными впускными объемами. Эти переключения могут осуществляться электрическими или электропневматическими клапанами или заслонками.

Механический наддув

В механических системах наддува привод нагнетателя осуществляется непосредственно от двигателя внутреннего сгорания (см. «Нагнетатели и турбонагнетатели»). При этом нагнетатель и двигатель внутреннего сгорания механически соединены друг с другом. Применяются механические объемные нагнетатели (компрессоры) различных конструкций (нагнетатели Roots, спиральные нагнетатели) и гидрокинетические компрессоры (например, радиальные компрессоры).

Рис. 14. Наддув с использованием специально настроенных впускных каналов (принцип):
1 – цилиндр, 2 – короткий впускной трубопровод; 3 – резонансная камера; 4 – резонансная трубка (настроенная трубка); 5 – общая камера; 6 – дроссельная заслонка (дроссельный узел); A, B – группы цилиндров

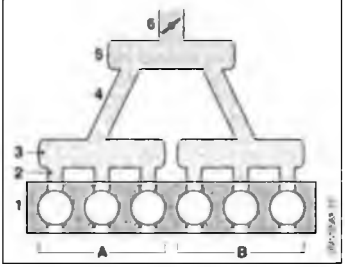


Рис. 15. Повышение коэффициента наполнения цилиндра зарядом при помощи динамического наддува
Частота вращения двигателя указана относительно номинальной частоты вращения: 1 – система с динамическим наддувом; 2 – система со стандартным впускным коллектором

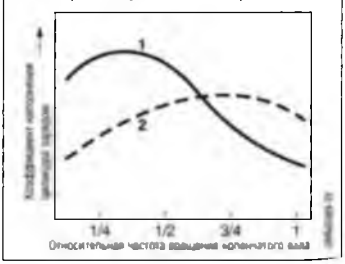
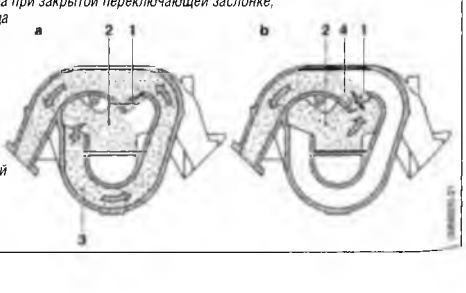


Рис. 13. Изменение геометрии впускного трубопровода (принцип):
a – геометрия впускного трубопровода при закрытой переключающей заслонке; b – геометрия впускного трубопровода при открытой переключающей заслонке;
1 – переключающая заслонка,
2 – общая камера;
3 – длинный; узкий колебательный впускной трубопровод при закрытой переключающей заслонке;
4 – короткий; широкий колебательный впускной канал при открытой переключающей заслонке



До настоящего времени коленчатый вал и вал нагнетателя соединяются с фиксированным передаточным отношением. Для привода нагнетателя могут использоваться механические или электромагнитные муфты. Давление наддува регулируется при помощи перепускного устройства с регулирующей заслонкой (регулятора давления наддува).

Преимущества механического наддува:
- нагнетатель установлен на холодной стороне двигателя;
- компоненты нагнетателя не оказывают влияния на работу системы выпуска отработавших газов;
- нагнетатель мгновенно реагирует на изменение нагрузки.

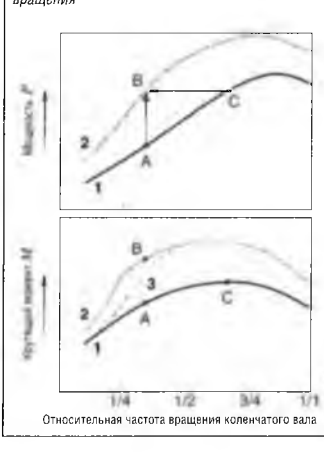
Недостатки механического наддува:
- мощность, требуемая для привода нагнетателя, отбирается от полезной мощности двигателя, что вызывает повышение расхода топлива;
- приемлемый уровень шума может быть достигнут только посредством специальных мер;
- сравнительно большой объем и вес системы;
- нагнетатель должен быть установлен на уровне приводного ремня

Турбонаддув с использованием отработавших газов

В системах турбонаддува с использованием отработавших газов некоторая часть энергии отработавших газов преобразуется в механическую энергию, необходимую для привода нагнетателя при помощи турбины (турбонагнетателя отработавших газов). Таким образом, этот процесс использует некоторую часть энтальпии, которая на безнаддувных двигателях остается неиспользованной. Однако эти системы вызывают увеличение противодавления отработавших газов. Для сжатия воздуха в таких системах используются исключительно гидрокинетические компрессоры.

Турбонагнетатели отработавших газов обычно применяются для создания высокого давления наддува даже при низких частотах вращения коленчатого вала двигателя. Другими словами, турбина турбонагнетателя рассчитана на среднюю частоту вращения. При этом следует учитывать, что при высоких частотах вращения давление наддува может возрастать до уровней, которые вызовут чрезмерные нагрузки на двигатель. Поэтому турбина снабжается перепускным клапаном, который при определенной частоте вращения начинает пропускать часть потока отработавших газов мимо турбины. При этом энергия этих отработавших газов остается неиспользованной. Значительно более удовлетворительные результаты (т.е. высокое давление наддува в нижнем диапазоне оборотов и в то же время возможность избежать перегрузки в верхнем диапазоне) могут быть получены при использовании турбонагнетателя с изменяемой геометрией турбины (VTG). В этих системах за счет изменения положения направляющих лопаток осуществляется регулирование сечения потока и угла атаки рабочих лопаток (и, таким образом, давления отработавших газов, поступающих на турбину) (см. «Нагнетатели и турбонагнетатели»).

Рис. 16. Сравнение кривых мощности и крутящего момента двигателей без наддува и с турбонаддувом
Частота вращения двигателя указана относительно номинальной частоты вращения
1 – двигатель без наддува в стационарном режиме работы;
2 – двигатель с турбонаддувом в стационарном режиме работы;
3 – увеличение крутящего момента двигателя с турбонаддувом в переходном режиме,
A⟶B – увеличение мощности и крутящего момента двигателя с турбонаддувом при такой же частоте вращения;
C⟶B – идентичная мощность двигателя с турбонаддувом при более низкой частоте вращения



Преимущества турбонаддува с использованием отработавших газов:
- значительное увеличение выходной мощности на литр рабочего объема;
- значительное снижение расхода топлива по сравнению с двигателями без наддува равной мощности;
- снижение содержания токсичных продуктов в отработавших газах;
- сравнительно небольшой занимаемый объем;
- может быть использован совместно с системами рециркуляции отработавших газов низкого давления.

Недостатки турбонаддува с использованием отработавших газов:
- установка турбокомпрессора в тракте с «горячими» отработавшими газами требует применения термостойких материалов;
- повышенная тепловая инерция в системе выпуска отработавших газов;
- без принятия дополнительных мер сравнительно низкий пусковой крутящий момент в случае установки на двигателях с малым рабочим объемом.

Специальные виды турбонаддува

В электрифицированных системах турбонаддува используется дополнительный электродвигатель, приводящий во вращение турбонагнетатель при отсутствии потока отработавших газов. Преимущество такой системы заключается в обеспечении турбонаддува в переходных режимах работы двигателя и при низких частотах вращения. Эти системы пока что не нашли применения в серийном производстве автомобилей ввиду их большой сложности и высокой потребляемой электрической мощности. Применение электрифицированных систем турбонаддува позволит значительно уменьшить занимаемый системой объем.

Еще один специальный вид турбонаддува - системы турбонаддува с использованием энергии волн сжатия, которые пока что не нашли применения в серийном производстве. Принцип действия основан на отражении волн сжатия во вращающемся секционном роторе (см. «Нагнетатели и турбонагнетатели»). Основным преимуществом является очень высокое быстродействие, обеспечивающее быстрое нарастание крутящего момента в переходных режимах. Однако применение таких систем связано с высокими затратами, а необходимость в отдельном приводе создает проблему нахождения соответствующего свободного пространства.

Диаграмма объемного расхода

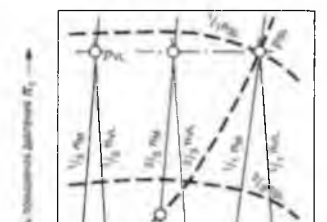
Картина зависимости работы нагнетателя от характеристик двигателя наглядно иллюстрируется диаграммой «давление–объемный расход» (рис. 17), на которой степень повышения давления в нагнетателе π_c соотносится с объемным расходом $\dot{V}$.

Особенно иллюстративны графики для недросселированных четырехтактных двигателей (дизельных), поскольку они содержат наклонные прямые линии (характеристики массового расхода двигателей), которые отражают возрастание объемного расхода воздуха по мере того, как степень повышения давления $\pi_c = p_2/p_1$ (где p_1 – давление наружного воздуха, а p_2 – давление наддува) возрастает при постоянной частоте вращения двигателя.

Диаграмма демонстрирует степень повышения давления при постоянных частотах вращения нагнетателя для нагнетателя с принудительным приводом и турбокомпрессора.

Только механические нагнетатели, у которых производительность пропорциональна их частоте вращения, пригодны для двигателей автомобилей. Это нагнетатели с принудительным приводом конструкции Roots. Турбокомпрессоры с механическим приводом непригодны.

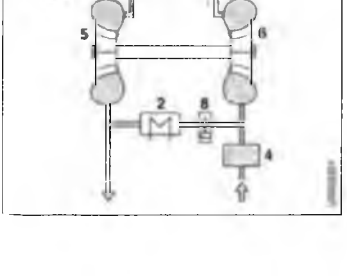
Рис. 17. Графики зависимости степени повышения давления в нагнетателе от объемного расхода для объемного нагнетателя с принудительным приводом и турбокомпрессора:
n – частота вращения, p_1 – давление наддува. Обозначения подстрочных индексов: VL – нагнетатель с принудительным приводом; SL – турбокомпрессор, M – двигатель



Система рециркуляции отработавших газов

Система внешней рециркуляции отработавших газов (EGR) является эффективным средством снижения температуры в камере сгорания. Горячие отработавшие газы отводятся и охлаждаются в охладителе системы EGR до температуры ниже 150 °C. Затем они смешиваются со свежим воздухом и подаются в камеру сгорания. Уменьшение количества кислорода в свежей смеси и высокая теплоемкость рециркулирующих отработавших газов вследствие наличия в них составляющих H_2O и CO_2 приводит к образованию зоны горения, температура в которой, в зависимости от скорости рециркуляции отработавших газов, снижена на несколько сотен градусов Цельсия. Благоприятными эффектами являются снижение содержания в выбросах оксидов азота NO_x, а также снижение тепловых потерь и температуры компонентов цилиндра. Основной целью является снижение содержания в отработавших газах токсичных продуктов.

Рис. 18. Система рециркуляции отработавших газов (система EGR)
Оба варианта (системы EGR высокого и низкого давления) показаны на одной общей схеме. Стрелки указывают направление потока:
1 – охладитель для системы EGR высокого давления;
2 – охладитель для системы EGR низкого давления,
3 – двигатель; 4 – воздушный фильтр;
5 – турбина; 6 – компрессор;
7 – промежуточный охладитель; 8 – клапан рециркуляции отработавших газов



Проблема, которую необходимо решить, заключается в транспортировке отработавших газов к стороне впуска свежего воздуха. Системы рециркуляции отработавших газов обычно применяются на двигателях с турбонаддувом. При этом имеют место два различных подхода (рис. 18). В случае системы рециркуляции отработавших газов низкого давления отработавшие газы отбираются после прохождения через турбину, охлаждаются и снова подаются в воздушный компрессор. В случае системы рециркуляции отработавших газов высокого давления, которая, в частности, предотвращает загрязнение компрессора и воздействие на него высоких тепловых нагрузок, рециркуляция отработавших газов осуществляется через сторону высокого давления. При этом между сторонами впуска и выпуска должен поддерживаться надлежащий перепад давления, иначе возникает ухудшение условий протекания цикла заряда. Иногда используются также флаттерные клапаны, т.е. клапаны, воспринимающие пульсации давления и открывающиеся только в случае превышения определенного порога давления на стороне выпуска отработавших газов.

Системы EGR низкого давления уже нашли применение на легковых и коммерческих автомобилях и продолжают совершенствоваться. Их привлекательными особенностями являются меньший неблагоприятный перепад давления (разность давлений на выходе из турбины и на входе воздушного компрессора). Однако, во избежание загрязнения компрессора такие системы требуют установки впускного фильтра твердых частиц. Следует также отметить более высокие тепловые нагрузки, которым подвергается компрессор.

Список литературы

[1] DIN 1940: Reciprocating internal combustion engines; terms, formulae, units.
[2] Flierl, R.; Hofmann, R.; Landerl, C.; Melcher, T.; Steyer, H.: Der neue BMW-Vierzylindermotor mit Valvetronic. MTZ 62 (2001), том 6.
[3] Langen, P.; Cosfeld R.; Grudno, A.; Reif, K.: Der Elektromechanische Ventiltrieb als Basis zuk nftiger Ottomotorkonzepte. 21st International Vienna Motor Symposium, Progress Reports VDI, Series 12, No. 420, Volume 2, 2000.
[4] v. Basshuysen, R.; Sch fer, F. (Editors): Handbuch Verbrennungsmotor, 5th Edition, Vieweg-Verlag, 2009.

Двигатель с возвратно-поступательным движением поршней

Компоненты

Кроме кривошипно-шатунного механизма, являющегося главным компонентом, отвечающим за создание крутящего момента, огромное влияние на к.п.д. двигателя внутреннего сгорания оказывает конструкция головки блока цилиндров (см. табл. 1).

Кривошипно-шатунный механизм и блок цилиндров с картером двигателя

Кривошипно-шатунный механизм включает следующие компоненты: поршни, поршневые кольца, шатуны и коленчатый вал. Общим для всех компонентов кривошипно-шатунного механизма является их поступательное и вращательное движение. Трибологическая конструкция кривошипно-шатунного механизма уже давно доказала свою важность ввиду ее надежности и низких потерь на трение.

Поршень

Ввиду высоких механических и тепловых нагрузок, которые поршень испытывает, он является очень сложным компонентом двигателя внутреннего сгорания. Геометрия днища и поверхностей поршня оказывают огромное влияние на процессы смесеобразования и сгорания топлива. Основным назначением поршня является передача усилий на шатун. При этом в поршне возникают сложные механические напряжения в сочетании с очень высокими локальными температурами, достигающими и превышающими 300 °C.

Роль днища поршня особенно важна на дизельных двигателях. При высокой степени сжатия и обычно плоской головке блока цилиндров в днище поршня должна помещаться практически вся камера сгорания. В настоящее время с успехом используются поршни с различными формами днища. Примеры форм днища поршней для дизельных двигателей показаны на рис.1.

Форма днища поршня в значительной степени определяет форму камеры сгорания и одновременно влияет на прочность головки поршня – фактор, являющийся крайне важным для передачи усилия на поршневой палец. Это в особенности относится к алюминиевым поршням, которые в настоящее время являются предпочтительным выбором, благодаря их высокой температурной стойкости, малой массе и высокому допустимому пиковому давлению.

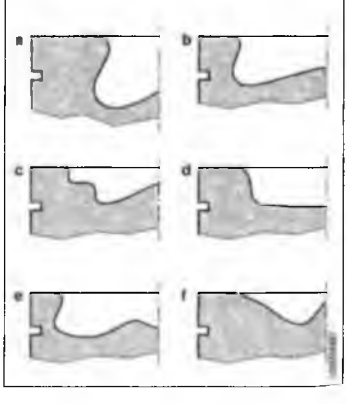
Поршневые пальцы в поршнях дизельных двигателей, испытывающих высокие нагрузки, устанавливаются в латунных втулках.

В дизельных двигателях, кроме алюминиевых, также могут использоваться стальные или даже чугунные поршни. Стальные поршни используются там, где пиковые давления превышают 200 бар. Важной отличительной особенностью стали является ее относительно низкая теплопроводность.

Для поршней современных двигателей с турбонаддувом с высокими пиковыми давлениями и выходными мощностями требуются дополнительные каналы охлаждения поршня (рис. 2). При этом моторное масло через вертикально расположенный инжектор впрыскивается в канал охлаждения поршня. Впуск и выпуск канала охлаждения поршня находятся на нижней стороне поршня.

Поршневые кольца образуют плотное соединение между поршнем и цилиндром

Рис. 1. Формы поршней дизельных двигателей:
a – глубокая омегаобразная выемка,
b – мелкая омегаобразная выемка;
c – ступенчатая выемка;
d – чашкообразная выемка;
e – эксцентриковая выемка;
f – W-образная выемка



и надежно разобщают между собой камеру сгорания и картер двигателя (рис. 3). Кроме уплотнения поршневые кольца также выполняют важную задачу передачи тепла через стенки цилиндра и контроля поступления масла в камеру сгорания.

Обычно устанавливаются три кольца; верхнее кольцо служит в качестве компрессионного, а нижнее – в качестве маслосъемного. Среднее кольцо часто выполняет обе эти функции. Поскольку фильтры твердых частиц со временем засоряются золой, которая является продуктом сгорания масла, расход масла и правильное прилегание поршневых колец к стенкам цилиндра являются крайне важными факторами.

Шатун

Шатун (рис. 4) соединяет поршень с коленчатым валом. Он передает силы, развиваемые

Таблица 1. Компоненты двигателя внутреннего сгорания

Узел	Компонент	Назначение и функции	Нагрузки
Блок цилиндров и картер двигателя	Блок цилиндров и картер двигателя	– Корпус для установки коленчатого вала. – Место установки головки блока цилиндров и ее крепления на блоке цилиндров болтами. – Место установки подшипников коленчатого вала – Место установки различных принадлежностей	Деформация – поток силы от головки блока цилиндров к коленчатому валу. Изгибающие моменты, вибрации, колебания и собственные частоты
	Несущая поверхность	Различные конструктивные решения: – применение гильз с уплотнением («мокрые» гильзы); – применение литых гильз («сухие» гильзы); – несущие поверхности поршней являются частью картера	Деформация (некруглость) сопрягающейся с поршнем части трибологической системы
Кривошипно-шатунный механизм	Поршень	– Преобразование энергии в камеры сгорания (давления газов) в поступательное движение. – Рассеивание тепла из камеры сгорания в окружающую среду. – Поглощение нормальных сил, возникающих вследствие наклона шатуна	Сложные механические и тепловые нагрузки (свыше 350 °C) в области выемки в поршне
	Поршневые кольца	– Уплотнение камеры сгорания относительно картера. – Предотвращение проникновения масла в цилиндр. – Рассеивание тепла через стенки цилиндра	Высокие механические и изгибающие нагрузки. Высокие тепловые нагрузки, сложная трибология
	Шатун и поршневой палец	– Поглощение сил, воздействующих на шатун и передача усилия на коленчатый вал для создания крутящего момента	Механические напряжения сжатия, растяжения и изгиба, сложный трибологический процесс
	Коленчатый вал	– Поглощение сил, воздействующих на шатун и передача усилия на коленчатый вал для создания крутящего момента	Сложные механические нагрузки: изгибающие усилия, моменты кручения, вибрации и колебания, силы растяжения и сжатия, вибрации и колебания, сложные трибологические процессы
Головка блока цилиндров	Головка блока цилиндров	– Управление циклом заряда – Охлаждение областей вблизи камеры сгорания – Размещение форсунок (на дизельных двигателях и бензиновых двигателях с прямым впрыском топлива) и свечей зажигания (на бензиновых двигателях)	Высокие термомеханические напряжения, усталость вследствие тепловых расширений и сжатий

Таблица 1. Компоненты двигателя внутреннего сгорания (продолжение)

Узел	Компонент	Назначение и функции	Нагрузки
Головка блока цилиндров	Распределительный вал (обычно располагается в головке блока цилиндров)	– Преобразование вращательного движения в поступательное для открытия и закрытия клапанов	Напряжения Герца
	Клапанный механизм	– Преобразование вращательного движения в поступательное для открытия и закрытия клапанов	Высокие усилия, развиваемые пружинами для обеспечения требуемой скорости закрытия клапанов
	Клапаны	– Открытие и закрытие впускных и выпускных каналов – Уплотнение камеры сгорания на стадии сжатия	Износ седла клапана вследствие высоких скоростей закрытия клапана. Высокие тепловые нагрузки выпускных клапанов
	Каналы	– Подача в цилиндр заряда смеси и выпуск продуктов горения. – Обеспечение желаемого движения заряда смеси в цилиндре	Локальные тепловые нагрузки
	Несущая плита	– Уплотнение и поглощение давления рабочих газов	– Локальные тепловые нагрузки. – Изгиб
	Механизм привода	– Привод распределительного вала, ременная, цепная или зубчатая передача	Неравномерности вращения с переменным контактом поверхностей
Прочие компоненты	Масляный насос	– Обеспечение подачи масла в требуемом количестве и с требуемым давлением	Момент сопротивления, особенно в случае высокой вязкости масла
	Масляный фильтр	– Фильтрация загрязнений, содержащихся в моторном масле	–
	Насос охлаждающей жидкости	– Обеспечение требуемой подачи охлаждающей жидкости. – Обеспечение требуемого расхода охлаждающей жидкости	Кавитация

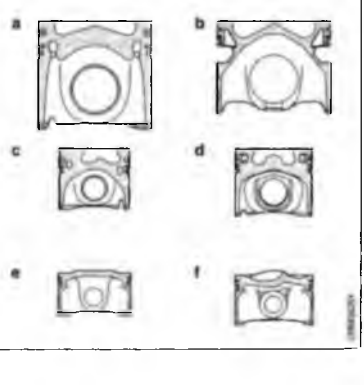


Рис. 2. Конструкции поршней различных двигателей:
a – алюминиевый поршень дизельного двигателя коммерческого автомобиля с кольцевой канавкой и каналом охлаждения;
b – кованый стальной поршень двигателя коммерческого автомобиля;
c – алюминиевый поршень дизельного двигателя легкового автомобиля, с кольцевой канавкой и каналом охлаждения;
d – алюминиевый поршень дизельного двигателя легкового автомобиля, с охлаждаемой кольцевой канавкой;
e – алюминиевый поршень двигателя с искровым зажиганием легкового автомобиля с MPI (многоточечным впрыском топлива);
f – алюминиевый поршень двигателя с искровым зажиганием легкового автомобиля с прямым впрыском топлива

газами и силы инерции на шатунную шейку коленчатого вала. Шатун испытывает напряжения растяжения, сжатия и изгиба. Шатун также содержит подшипники для соединения с коленчатым валом и поршневым пальцем. Поэтому он должен иметь очень жесткую конструкцию, в особенности в областях головок, содержащих подшипники. По этой причине шатуны имеют двутавровый профиль тела и изготавливаются методом ковки из отпущенной стали. Также с успехом могут применяться металлокерамические материалы. Иногда, для условий низких нагрузок (двигателей с искровым зажиганием), в качестве материала для шатунов используется отожженный чугун. Реже на V-образных двигателях встречается комбинация «стандартных» и вилкообразных шатунов, позволяющая получить точное расположение оппозитных цилиндров.

Длина шатуна определяется величиной рабочего хода поршня и радиусом противовеса (геометрическим путем наружного контура, называемым «скрипкой шатуна»). На коммерческих автомобилях с относительно большим отношением рабочего хода к диаметру отверстия цилиндра (более 1,1) и большими диаметрами подшипников обычными являются разъемные большие головки шатунов с косым разъемом. Это позволяет снять поршень без снятия коленчатого вала. Однако, угловой разъем вызывает значительные усилия сдвига, даже когда шатун находится в вертикальном положении в верхней мертвой точке. Эти усилия обычно поглощаются зубцами, канавками и пружиной или посредством поверхностного растрескивания. Растрескивание большой головки шатуна достигается под действием «разрывной сепарации» – чрезвычайно высоких (гидравлических) усилий растяжения и в результате целенаправленного ослабления поперечного сечения у большой головки шатуна. Крышка подшипника большой головки шатуна и шатун могут устанавливаться только в комплекте.

Сквозные болты могут использоваться с гайками или без гаек. Правильная установка вкладышей подшипников при посадке обеспечивается переходными втулками или кольцами.

Ориентация шатуна в боковом направлении может осуществляться на коленчатом вале, со стороны большой головки шатуна, или в поршне, со стороны малой головки.

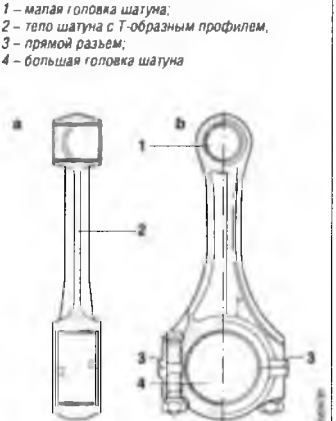
Малая головка шатуна должна поглощать значительные усилия, поэтому часто выполняется с формованным отверстием, во избежание смещения. Для дизельных двигателей, с их высокими пиковыми давлениями и большими силами, развиваемыми рабочими газами, выбирается специальная форма малой головки

Рис. 3. Формы и конфигурации поршневых колец
Дизельный двигатель:
1 – поршневое кольцо трапецевидного сечения;
2 – компрессионное кольцо с внутренним скосом;
3 – ступенчатое компрессионное кольцо;
4 – пружинящее маслосъемное кольцо с двумя скосами и расширителем спирального типа

Бензиновый двигатель:
5 – поршневое кольцо бочкообразной формы;
6 – компрессионное кольцо со скосом;
7 – ступенчатое кольцо;
8 - кольцо с двумя скосами ;
9 – многосекционное маслосъемное кольцо



Рис. 4. Шатун двигателя легкового автомобиля:
a – вид в разрезе; b – вид сбоку;
1 – малая головка шатуна;
2 – тело шатуна с Т-образным профилем,
3 – прямой разъем;
4 – большая головка шатуна



шатуна, обеспечивающая большую поверхность контакта с поршневым пальцем без ослабления поршня. Эта форма может быть трапецеидальной (узкая вверху и широкая внизу) или ступенчатой (узкий буртик вверху и широкий внизу).

Конструкция шатуна разрабатывается с учетом результатов расчетов сил, развиваемых рабочими газами и сил инерции (см. «Конструкция коленчатого вала»). Также выполняется расчет продольного изгиба. При этом необходимо рассчитать продольный изгиб в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала, как изгиб шарнирно опертой балки, и изгиб в плоскости, параллельной оси коленчатого вала (продольной плоскости двигателя), как изгиб балки, заделанной двумя концами. Критичные сечения в области перехода от стабильной в отношении размеров малой головки к двутавровому профилю тела обычно рассчитываются с использованием метода FEM (метод конечных элементов). При этом не следует недооценивать или игнорировать нагрузки со стороны крышек подшипников.

Коленчатый вал

Коленчатый вал (рис. 5) служит для преобразования возвратно-поступательного движения поршней во вращательное движение. Энергия поступательного движения трансформируется в крутящий момент, который затем может быть передан на сцепление.

Рис. 5. Коленчатый вал двигателя коммерческого автомобиля:
1 – передний конец коленчатого вала;
2 – коренная шейка;
3 – шатунная шейка с отверстием для подачи смазки;
4 – главная щека (без противовеса);
5 – главные щеки;
6 – промежуточная щека;
7 – смещенная шатунная шейка (раздельная шейка);



Коренные подшипники коленчатого вала закреплены в картере двигателя, в то время как на шатунных шейках устанавливаются шатунные подшипники. Напротив щек с шатунными шейками устанавливаются противовесы, которые могут быть литыми, коваными или могут крепиться болтами. В зависимости от типа двигателя коренные подшипники коленчатого вала устанавливаются после каждого цилиндра, например, на рядных дизельных двигателях и двигателях с искровым зажиганием с высокими нагрузками или только после каждого второго кривошипа коленчатого вала (на двигателях с искровым зажиганием с низкими нагрузками). На V-образных двигателях обычно одна шатунная шейка используется для двух соседних шатунов на одном кривошипе. Это также относится к вильчатым шатунам, позволяющим выполнить точную установку двух оппозитных блоков цилиндров. В целях обеспечения равномерных интервалов зажигания на V-образных 6-цилиндровых двигателях с углом 90° между цилиндрами, все шире используется конструкция с «раздельной шейкой», позволяющая выполнить смещение двух соседних шатунных шеек на 30° в очень ограниченном пространстве без коренного подшипника между ними. Такая конструкция применяется даже в дизельных двигателях коммерческих автомобилях, испытывающих высокие нагрузки.

Коленчатые валы обычно изготавливаются методом ковки (в зависимости от размера – штамповки или свободной ковки); для двигателей с невысокими нагрузками – в основном из чугуна (с шаровидным графитом). На больших двигателях также используются составные коленчатые валы. Отверстия для подачи смазочного масла к шатунным подшипникам расположены таким образом, чтобы не создавать дополнительных механических напряжений.

Силы, развиваемые рабочими газами, и силы инерции (см. конструкцию кривошипно-шатунного механизма) вызывают в коленчатом вале напряжения изгиба (рис. 6). Если коренные подшипники установлены после каждого кривошипа, изгибающие нагрузки относительно невелики, благодаря тангенциальным силам. Однако, следует обратить особое внимание на переход между шатунной шейкой и щекой коленчатого вала, поскольку именно здесь возникают самые большие напряжения. При большом количестве коренных подшипников зажим коленчатого вала теоретически

представляет собой статически сверхопределенную систему, однако при моделировании предполагается, что система имеет статически определенное состояние, которое правильно описывает критическое состояние.

Еще одним важным фактором являются крутильные колебания, которые, за счет переменных сил, прилагаемых со стороны каждого отдельного цилиндра (силы кручения, см. «Конструкция коленчатого вала») возбуждают всю систему коленчатого вала, и ввиду его значительной длины могут вызвать его собственный резонанс.

Колебательная система, состоящая из поршня, шатуна и коленчатого вала, является сложной системой с постоянно изменяющимися крутящими усилиями. Чем дальше от оси вала находятся противовесы, тем большее имеет место возбуждение. По этой причине, в некоторых случаях тяжелые металлические противовесы крепятся болтами. Простое моделирование может быть выполнено, предполагая, что коленчатый вал является безынерционным упругим валом с присоединенными эквивалентными массами. Затем колебательная система может быть определена с использованием такого параметра, как жесткость торсионного вала. Определенной собственной демпфирующей способностью обладают литые валы. Таким образом, коленчатый вал испытывает изменяющиеся в пространстве и во времени торсионные нагрузки.

Крутильные колебания коленчатого вала, которые также называют крутильными колебаниями 2-го порядка (см. демпфер колебаний коленчатого вала) следует уменьшить при помощи подходящих демпферов. Это необходимо для защиты коленчатого вала от чрезмерно высоких нагрузок.

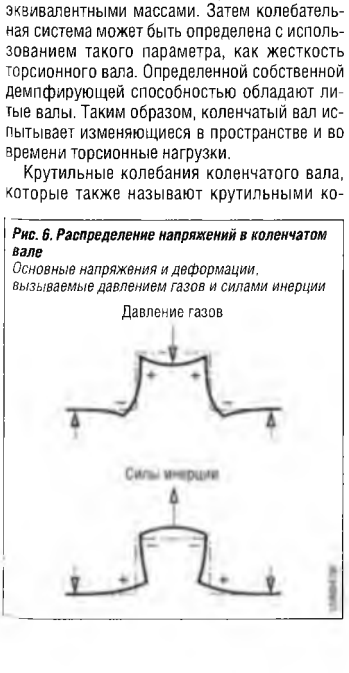


Рис. 6. Распределение напряжений в коленчатом вале
Основные напряжения и деформации, вызываемые давлением газов и силами инерции

Блок цилиндров и картер двигателя

Картер служит опорой для передачи усилий, возникающих при сгорании рабочей смеси, на коленчатый вал, а также опорой для подшипников коленчатого вала. В конструкцию блока, обычно отливаемого заодно с картером, входят гильзы цилиндров, водяная рубашка и герметизированные масляные полости и каналы. Блок цилиндров и картер также должны поглощать силы реакций и обеспечивать место для установки многих дополнительных компонентов.

Обычно для поглощения сил используется жесткая конструкция (концепция опорной балки); эта структура служит для обеспечения прямого, линейного и свободного от изгибающего момента потока сил. Обычно это достигается за счет усилительных ребер, а в случае конструкции с болтовыми соединениями – за счет сквозных болтов.

Головка блока цилиндров обычно крепится к блоку болтами, как отдельный компонент, а на больших двигателях к блоку крепятся отдельные головки цилиндров. Часто используются четыре болта на одну головку, причем два болта являются общими для двух соседних цилиндров. На двигателях с высокими пиковыми давлениями (свыше 200 бар) могут использоваться шесть или восемь болтов. Это необходимо для как можно более равномерного распределения давления на прокладку головки блока цилиндров.

Крышки подшипников коленчатого вала обычно крепятся к картеру болтами снизу. В конструкции со сквозными болтами длинный болт проходит от головки блока цилиндров до крышки подшипника. Преимущество этой конструкции заключается в том, что она позволяет использовать стали с высоким пределом прочности на разрыв, которые могут передавать усилия растяжения лучше, чем литые материалы.

В целях обеспечения достаточной жесткости картер обычно вытянут вниз по бокам, ниже уровня коленчатого вала. Иногда для снижения веса и увеличения жесткости может использоваться отдельная рама («опорная плита»). Иногда боковые стенки дополнительно крепятся горизонтально расположенными болтами в области подшипников коленчатого вала в целях еще большего увеличения

жесткости. Снизу к блоку крепится масляный поддон, который иногда также оказывает эффект увеличения жесткости. Однако это относится только к литым масляным поддонам.

Опорная поверхность поршня может быть образована отдельным компонентом (гильзой), в особенности при необходимости в замене на протяжении срока службы картера, например, на коммерческих автомобилях с большим общим пробегом (так называемая «мокрая гильза», поскольку она омывается охлаждающей жидкостью). Однако опорную поверхность для поршня также может образовывать непосредственно литой картер, в особенности из алюминиевого сплава или чугуна.

На современных двигателях картеры имеют очень высокий уровень функциональности и, следовательно, являются очень сложными компонентами. Часто литой картер содержит корпус масляного насоса, выполняет функции маслоохладителя, содержит корпус термостата системы охлаждения, установочные опоры уравновешивающего вала и кронштейны для крепления тех или иных принадлежностей.

Кроме коленчатого вала, картер является компонентом, на долю которого приходится основная доля веса двигателя. Поэтому в настоящее время прилагаются большие усилия, направленные на снижение веса картера за счет применения материалов, иных чем обычный серый чугун. К таким материалам относятся алюминиевые сплавы, которые, однако, в связи с ограниченным в тепловом отношении сроком службы, используются в основном для изготовления картеров небольших двигателей легковых автомобилей. Общепринятым экономичным технологическим процессом изготовления алюминиевых картеров стало литье под давлением, в то время как в остальных случаях применяется литье в песчаные формы. Картеры из алюминиевого сплава обычно имеют конструкцию «открытой плиты», т.е. на поверхность разъема с головкой блока цилиндров выходят каналы водяной рубашки и возврата масла. Что касается чугунных картеров, верхняя сторона картера делается закрытой в целях максимального увеличения жесткости.

Также предпринимались попытки изготавливать картеры из магния в целях еще большего снижения веса, однако это оказалось слишком дорогостоящим. По этой причине используется «гибридная» концепция материалов, где несущие функции выполняет алюминий, а экранирующие - магний.

Дальнейшее повышение прочности также осуществляется за счет применения других видов чугуна. Так, в последнее время более широко стал использоваться уплотнённый серый чугун (CGI). Для создания высокопрочной (и трудно обрабатываемой) структуры с шаровидным графитом вместо обычного пластинчатого графита применяются специальные процессы термообработки и охлаждения чугуна. Это дает возможность сделать стенки картера двигателя тоньше и уменьшить его вес.

Картер также выполняет очень важную функцию шумопоглощения. Поскольку он часто бывает непосредственно соединен с камерой сгорания, поглощая большие усилия, развиваемые рабочими газами, и силы инерции, и имеет относительно большую площадь поверхности, крайне важно, чтобы эта поверхность была жесткой. Стандартными средствами повышения жесткости являются ребра жесткости и галтовка, которые также помогают предотвратить мембранный эффект.

Переменная степень сжатия

Переменная степень сжатия желательна как на двигателях с искровым зажиганием для снижения тенденции к детонации в диапазоне высоких нагрузок, так и на дизельных двигателях с целью снижения пиковых давлений при полной нагрузке. Однако, к настоящему времени на дизельных двигателях не было реализовано каких-либо механических или гидравлических систем регулирования степени сжатия. Причиной этого являются высокие нагрузки, испытываемые дизельными двигателями в связи с более высокими пиковыми давлениями, и более высокие градиенты давления по сравнению с двигателями с искровым зажиганием.

Конструкции систем регулирования степени сжатия (VCR) можно разделить на следующие:

- решения, связанные с конструкцией поршня (гидравлическое исполнительное устройство, перемещающее верхнюю секцию поршня относительно нижней секции);
- решения, связанные с изменением длины шатуна (смещение картера, сочлененный шатун, эксцентриковый подшипник малой головки шатуна);
- изменение положения картера относительно положения головки блока цилиндров (поворот или осевое смещение картера, эксцентриковый подшипник коленчатого вала);

- соединительный рычаг для изменения эффективного хода поршня (многозвенный рычажный механизм привода коленчатого вала, изменение рабочего объема с вариацией ε);
- дополнительные переменные объемы (дополнительный переменный объем в головке блока цилиндров).

Системы регулирования степени сжатия на двигателях с искровым зажиганием позволяют изменять степень сжатия ε в диапазоне от 7 до 14.

Головка блока цилиндров

Основные функции головки блока цилиндров заключаются в подаче в цилиндры свежей смеси, выпуске отработавших газов и поглощении давления в цилиндрах.

Головка блока цилиндров

Головка блока цилиндров обеспечивает герметизацию верхней части картера и блока цилиндров. На двигателях с искровым зажиганием она содержит клапаны и свечи зажигания, на двигателях с искровым зажиганием с прямым впрыском топлива – также топливные форсунки. На дизельных двигателях в головке блока цилиндров размещены топливные форсунки и, возможно, свечи предпускового подогрева. Совместно с днищами поршней, головка блока цилиндров образует камеру сгорания. На большинстве двигателей легковых автомобилей в головке блока цилиндров размещается привод клапанов газораспределительного механизма.

Головка блока цилиндров выполняет различные функции и испытывает нагрузки сложной формы. Кроме точного управления газообменом и движением заряда топлива, которые непосредственно влияют на состав отработавших газов, к.п.д. и выходную мощность двигателя, проблема заключается прежде всего в охлаждении горячей стороны головки блока цилиндров и ограничении сложных механических и тепловых нагрузок.

В зависимости от направления движения рабочей смеси на впуске и отработавших газов на выпуске применяются две основные формы головок цилиндров. В головке блока цилиндров с односторонним расположением каналов впускные и выпускные каналы выходят на одну и ту же сторону головки (рис. 7, b). Это уменьшает пространство, необходимое для размещения каналов, хотя более короткие тракты создают преимущества при использовании наддува без промежуточного охлаждения. Также такая головка рациональна в автомобилях с поперечным расположением двигателей.

В головке блока цилиндров с расположением каналов с разных сторон впускные и выпускные каналы находятся на противоположных сторонах двигателя (рис. 7, a), что обеспечивает диагонально направленные потоки впускных и отработавших газов. К преимуществам схемы относится простота конструкции впускных и выпускных трактов, а также менее сложные способы уплотнения. Обычно выбор конструкции головки блока цилиндров определяется в основном особенностями автомобиля.

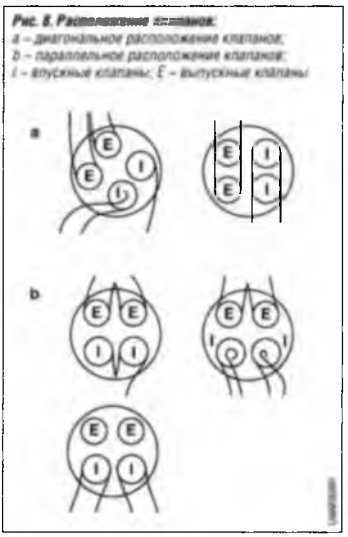
Этот выбор также определяет компоновку клапанного механизма. Современные многоклапанные механизмы требуют использования головок с диагональным расположением клапанов. Основным преимуществом такого расположения клапанов является простое создание интенсивных завихрений в цилиндре. Параллельное расположение клапанов требует для создания завихрений более высоких усилий на концах каналов (рис. 8).

В современных легковых автомобилях практически исключительно применяются рядные, цельные головки блока цилиндров. Для V-образных двигателей принято устанавливать отдельную головку блока цилиндров на ряд. Отдельные головки цилиндров пока что часто применяются в двигателях коммерческих автомобилей, на которых распределительный вал с толкателями иногда устанавливается в блоке цилиндров.



Рис. 7. Головки блока цилиндров с различным расположением трактов впуска и выпуска:
a – со сквозным потоком,
b – с противотоком

В отличие от легковых автомобилей, на которых головка блока цилиндров часто изготавливается из алюминия, что дает преимущество в отношении веса и отвода тепла из камеры сгорания, на коммерческих автомобилях применяются головки блока цилиндров из чугуна. Это обусловлено тем, что легкие сплавы не обладают усталостной прочностью, необходимой для работы в условиях высоких пиковых давлений и при большом диаметре цилиндров.



Головка блока цилиндров подвергается очень высоким нагрузкам. С одной стороны частые изменения температуры и сопровождающее их тепловое расширение вызывает механические напряжения, которые могут быть скомпенсированы только посредством соответствующих конструктивных мер (отдельные головки цилиндров, полости в многоцилиндровых головках и т.д.). Термомеханическая стойкость головки определяется количеством профилей тепловой нагрузки.

В многоклапанных конструкциях особенно высокие температуры имеют место в области между выпускными клапанами. При полной нагрузке здесь достигаются критические температуры свыше 350°C. Такие же высокие температуры имеют место в области днища поршня (рис. 9). Чугунные головки имеют склонность к развитию коррозии под действием горячих газов, т.е. поверхностного окисления, которое может перейти в опасное растрескивание.

Рис. 9. Распределение температур в поршне двигателя при полной нагрузке (схематичное), значения в °C:
a – поршень дизельного двигателя легкового автомобиля, давление газов – 16 МПа, мощность – 58 кВт;
b – поршень двигателя с искровым зажиганием легкового автомобиля, давление газов – 7,3 МПа, мощность – 53 кВт



Важные функции выполняет прокладка головки блока цилиндров, расположенная между картером двигателя и головкой блока цилиндров. Во-первых, она должна служить уплотнением камеры сгорания даже в случае высоких давлений в цилиндрах, а во-вторых – обеспечивать поток моторного масла и охлаждающей жидкости между картером и головкой. Как правило, для уплотнения камеры сгорания используются металлические материалы; эти металлические прокладки плотно прилегают к поверхности за счет пластичной деформации и обеспечивают уплотнение за счет своей эластичности. Также применяются прокладки из эластомерных материалов или геометрически оптимизированные прокладки из листового металла.

Чтобы обеспечить равномерное прижатие прокладки головки блока цилиндров, можно увеличить количество болтов головки. На двигателях коммерческих автомобилей количество болтов достигает восьми на один цилиндр.

Двигатели без прокладки головки блока цилиндров являются исключением, поскольку в этом случае требуется чрезвычайно высокая чистота и точность обработки сопрягающихся поверхностей картера и головки блока цилиндров.

Клапанный газораспределительный механизм

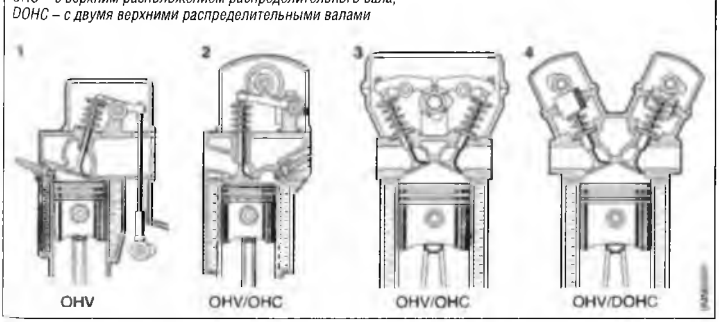
Функцией клапанного газораспределительного механизма на четырехтактном двигателе является управление процессами газообмена. Механизм содержит впускные и выпускные клапаны, пружины, обеспечивающие их закрытие и распределительный вал с приводом (рис. 10). Широко распространены следующие схемы:

Если распределительный вал установлен внутри блока, коромысло перемещается не непосредственно кулачком вала, а штангой и коромыслом (см. рис. 10, 1).

При верхнем расположении распределительного вала с приводом клапанов при помощи рычажного толкателя силы при подъеме кулачка воспринимаются и передаются установленным в головке блока качающимся рычажным толкателем, перемещающимся между кулачком и клапаном. Кроме передачи усилий и поглощения боковых сил промежуточный рычажный толкатель служит для увеличения хода клапана (рис. 10, 2).

В случае сдвоенных коромысел, приводимых в движение кулачком, оси их поворота расположены между распределительным валом и клапаном, при этом каждое коромысло действует в качестве передающего усилие элемента. Коромысло обычно конструируется так, чтобы оно увеличивало перемещение клапана (рис. 10, 3).

Рис. 10. Конструкции клапанного механизма
(источник: [1]).
1 – со штангой и коромыслом; 2 – с рычажным толкателем; 3 – со сдвоенными коромыслами;
4 – с верхним расположением толкателей;
OHV – с верхним расположением клапанов;
OHC – с верхним расположением распределительного вала;
DOHC – с двумя верхними распределительными валами



Верхнее расположение клапанов, приводимых цилиндрическим толкателем: непосредственно от распределительного вала толкатель перемещается в головке блока цилиндров возвратно-поступательно и воспринимает поперечное усилие со стороны кулачка с одновременной передачей воздействующего усилия на стержень клапана (рис. 10, 4).

Компоновка клапанного механизма

Компоновка клапанного механизма и конструкция камеры сгорания тесно взаимосвязаны. Сегодня почти все механизмы газораспределения являются верхнеклапанными и размещаются в головке блока. В дизелях и многих двигателях с искровым зажиганием клапаны располагаются параллельно оси цилиндра и обычно приводятся от двух коромысел через толкатели или каждый клапан приводится от своего коромысла. Все большее распространение получают двигатели с искровым зажиганием, у которых впускные и выпускные клапаны располагаются напротив друг друга (с развалом). Это позволяет увеличить диаметры клапанов и оптимизировать конструкцию впускного и выпускного трактов. Здесь наиболее часто применяются двойные клапанные коромысла, приводимые от верхнего распределительного вала. В форсированных двигателях все чаще применяют четыре клапана на один цилиндр и верхний распределительный вал с непосредственным приводом клапанов.

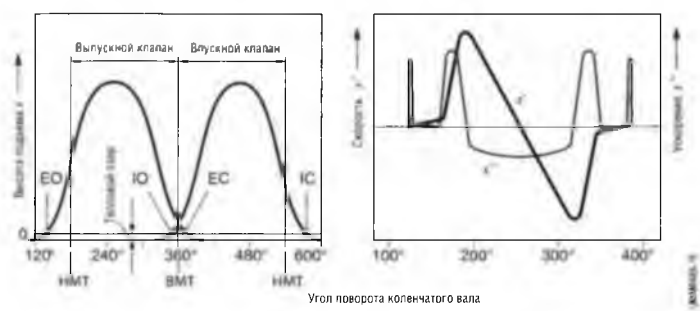
На диаграмме работы клапанного механизма (рис. 11) показаны моменты открытия и закрытия клапанов, кривые высоты подъема клапанов скорости и ускорения перемещения клапанов.

Типичные значения ускорения клапанов на двигателях легковых автомобилей (с верхним расположением распределительного вала):
s'' = 60...65 мм $(b/\omega^2) \rightarrow$ 6400 м/с^2 при 6000 мин$^{-1}$ для механизмов с одинарными и сдвоенными коромыслами.
s'' = 70...80 мм $(b/\omega^2) \rightarrow$ 7900 м/с^2 при 6000 мин$^{-1}$ для механизмов с верхним расположением толкателей.
Для двигателей тяжелых коммерческих автомобилей с распределительным валом, установленным в блоке цилиндров:
s'' = 100...120 мм $(b/\omega^2) \rightarrow$ 2000 м/с^2 при 2400 мин$^{-1}$.

Клапан, направляющая клапана и седло клапана

Материалы, применяемые для изготовления клапанов, должны обладать высокой термостойкостью; контактная поверхность седла клапана часто подвергается закалке. Для интенсификации теплопередачи выпускные клапаны заполняют натрием. Для увеличения долговечности и улучшения уплотнения по-

Рис. 11. Диаграмма фаз газораспределения:
s – высота подъема клапана; s' – скорость клапана, s'' – ускорение клапана;
IC – закрытие впускного клапана; IO – открытие впускного клапана; EC – закрытие выпускного клапана;
EO – открытие выпускного клапана



лучили широкое распространение системы вращения клапана (rotocaps).

Направляющие клапанов в двигателях высокой мощности должны обладать высокой теплопроводностью и хорошими антифрикционными свойствами. Они обычно запрессовываются в головку блока и снабжаются уплотнениями со стороны привода для уменьшения расхода масла.

Износ седла клапана может быть снижен путем его изготовления из чугуна или металлокерамического материала с последующей прессовой посадкой его в головку цилиндров.

Конструкция кулачков и динамика работы клапанного механизма

Кулачок должен обеспечивать подъем клапана на заданную высоту с наибольшей скоростью и плавностью. Клапанная пружина осуществляет закрытие клапана, а также поддерживает постоянный контакт между поверхностью кулачка и клапаном. Возникающие динамические нагрузки накладывают ограничения на высоту подъема клапана и профиль кулачка.

Изредка встречаются конструкции, в которых используется собственный механизм возврата клапанов (Desmotronic). Их преимущество заключается в более высоких скоростях движения клапанов. При этом кривая движения клапана приближается к идеальной прямоугольной форме. Фрикционное соединение между распределительным валом, промежуточными элементами и клапаном должно обеспечиваться обычными пружинами. Небольшой зазор может иметь место только, когда подъем кулачка неактивен. На современных двигателях применяются гидравлические устройства компенсации изменения зазоров клапанов. В противном случае требуется периодическая регулировка зазоров. Для впускных и выпускных клапанов величина зазора составляет 0,1–0,2 мм.

Привод распределительного вала

На четырехтактных двигателях распределительный вал должен быть соединен с коленчатым валом таким образом, чтобы за один оборот коленчатого вала распределительный вал совершал пол-оборота.

На современных двигателях легковых автомобилей с верхним расположением распределительного вала (валов) для его привода используются цепные или ременные передачи (зубчатые ремни). В обоих случаях требуется натяжитель, воздействующий на свободный пробег цепи или ремня в целях предотвращения неконтролируемой вибрации.

Ввиду минимального пространства между поршнем и клапаном на современных двигателях, крайне важно, чтобы привод распределительного вала работал абсолютно надежно, поскольку в случае его повреждения столкновение поршней с клапанами может привести к серьезной поломке двигателя.

По этой причине нажимные пальцы направляющих натяжителя в цепной или ременной передаче, которые являются изнашивающимися частями, требуют регулярной замены. Современные двойные цепи очень долговечны и подвержены только минимальному износу. Недостатками цепей являются необходимость в смазке и удлинение во время работы. Большое преимущество цепей, однако, заключается в том, что они не могут соскочить со звездочек, и для них не существует опасности разрыва.

Зубчатые передачи для привода распределительных валов обычно применяются на двигателях коммерческих автомобилей или двигателях с распределительным валом, установленным в блоке цилиндров. Однако на двигателях с верхним расположением распределительного вала такое техническое решение является очень дорогостоящим, хотя и очень долговечным и надежным.

Иногда применяется вертикальный вал, ось которого перпендикулярна к осям коленчатого и распределительного валов.

Подача масла

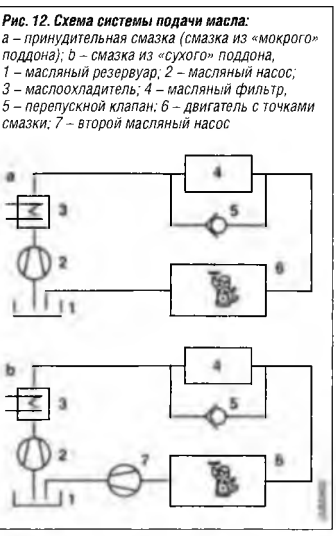
Кроме смазки всех критичных компонентов кривошипно-шатунного механизма, головки блока цилиндров и других компонентов система подачи масла служит для удаления местных загрязнений, остаточных продуктов сгорания топлива и частиц металла, образующихся в результате износа, которые фильтруются масляным фильтром. Дополнительные функции включают рассеивание тепла в областях, испытывающих тепловые нагрузки, таких как подшипники скольжения коленчатого вала или охлаждаемые маслом поршни, и демпфирование вибраций в подшипниках.

В обычной системе смазки (см. «Смазка двигателя») шестеренчатый масляный насос подает определенный объем масла из масляного поддона. Масло проходит через масляный фильтр (см. рис. 12, а). Из соображений безопасности полнопоточный масляный фильтр часто снабжается перепускным клапаном и клапаном контроля давления. Маслоохладитель, устанавливаемый на двигателях, работающих в условиях высоких нагрузок, имеет воздушное или водяное охлаждение. Поток масла проходит через масляные каналы и под действием силы тяжести сливается обратно в масляный поддон, обычно расположенный под картером двигателя. Поэтому принудительную смазку иногда также называют «смазкой из мокрого поддона». В дополнение к непосредственной подаче масла, осуществляемой масляным насосом, вращательное движение коленчатого вала способствует образованию в картере масляного тумана.

В отличие от обычной системы смазки, иногда применяется более дорогостоящая система смазки «из сухого поддона» (см. рис. 12, b). Преимущества этой системы заключаются в гарантированной подаче масла в условиях высоких поперечных ускорений или бокового наклона и свободном выборе расположения системы подачи масла. Она также позволяет уменьшить высоту двигателя и увеличить расход масла, что улучшает для охлаждение двигателя.

Смазка путем добавки масла в топливо и проточная смазка, часто используемые на двухтактных двигателях и двигателях Ванкеля, в настоящее время в автомобилестроении не являются актуальными.

Рис. 12. Схема системы подачи масла:
а – принудительная смазка (смазка из «мокрого» поддона); b – смазка из «сухого» поддона, 1 – масляный резервуар; 2 – масляный насос; 3 – маслоохладитель; 4 – масляный фильтр, 5 – перепускной клапан; 6 – двигатель с точками смазки; 7 – второй масляный насос



Система охлаждения

Чтобы избежать тепловых перегрузок, сгорания смазочного масла на направляющей поверхности поршня и неуправляемого сгорания горючей смеси, из-за перегрева отдельных деталей, все части двигателя, располагаемые вокруг камеры сгорания (гильза цилиндра, головка блока, клапаны и, в некоторых случаях, сами поршни), должны интенсивно охлаждаться (См. также «Охлаждение двигателя»).

Так как вода или другие охлаждающие жидкости обладают высокой теплоемкостью и обеспечивают эффективный отвод теплоты от нагретых поверхностей, большинство современных двигателей имеют жидкостные системы охлаждения. Кроме того, в условиях очень высоких местных температур можно за счет местного испарения охлаждающей среды достичь дополнительного охлаждающего эффекта, который, совместно с конденсацией в более холодных соседних областях, снижает нежелательные высокие градиенты температуры.

Наиболее распространенной является система с рециркуляцией воздуха/охлаждающей жидкости (рис. 13). Система содержит замкнутый охлаждающий контур, позволяющий применять антикоррозионные и низкозамерзающие присадки (антифризы). Охлаждающая жидкость прокачивается

насосом через двигатель и радиатор. При движении автомобиля поток охлаждающего воздуха проходит через радиатор свободно и/или с помощью вентилятора. Температура охлаждающей жидкости регулируется термостатическим клапаном (термостатом), обеспечивающим, при необходимости, ее перепуск, минуя радиатор.

Системы воздушного охлаждения в настоящее время не имеют широкого распространения. Строгие требования к содержанию вредных веществ в выбросах требуют эффективного охлаждения двигателей с высокой удельной выходной мощностью. Это практически недостижимо при помощи систем воздушного охлаждения, которые, хотя и являются надежными и малообслуживаемыми, как правило не обеспечивают требуемой эффективности. Еще одним их крупным недостатком является высокий уровень шума. Охлаждающие ребра действуют в качестве резонаторов и вызывают заметное увеличение уровня шума.

Успокоитель вибрации коленчатого вала

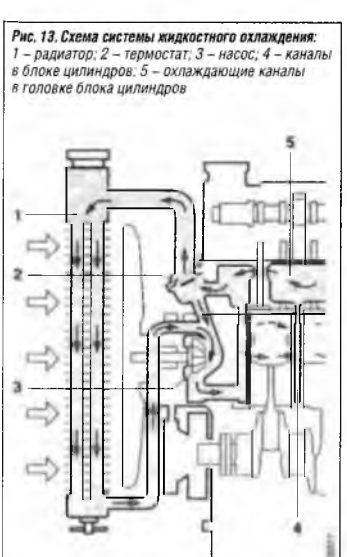


Рис. 13. Схема системы жидкостного охлаждения: *1 – радиатор; 2 – термостат; 3 – насос; 4 – каналы в блоке цилиндров; 5 – охлаждающие каналы в головке блока цилиндров*

Коленчатый вал подвержен высокочастотным колебаниям (крутильные колебания 2-го порядка), особенно в области резонансных частот. Для предотвращения опасного резонанса служат успокоители вибрации коленчатого вала.

Конструкция успокоителей вибрации коленчатого вала варьируется от простых маховиков, которые через эластичные, например, резиновые прокладки создают антивибрационную систему, к более сложным маховикам с масляным демпфированием, в которых демпфирующий эффект создается за счет вязкости масла и поверхностей трения, и далее к сложным поглотителям вибрации маятникового типа (Sarazen (Франция), Chilton (США)). Успокоитель вибрации обычно устанавливается на свободном конце коленчатого вала (переднем).

Крутильные колебания 1-го порядка, т.е. вибрации, вызываемые зажиганием и силами инерции, и способные возбуждать вибрацию ведущего вала и других компонентов трансмиссии, демпфируются при помощи сдвоенных маховиков или иных устройств. При помощи таких успокоителей можно сгладить такие явления, как прихватывание сцепления, вибрация в трансмиссии и рывки при трогании с места, поскольку все последующие компоненты – сцепление, трансмиссия и ведущие валы – представляют собой колебательную систему. В сдвоенном маховике две массы соединяются друг с другом при помощи пружин. Успокоителями вибраций также часто снабжается сцепление. Оба компонента естественно должны быть настроены совместно.

Разработка конструкции и настройка успокоителей вибрации являются достаточно сложными. На стадии окончательного анализа необходимо выполнить испытания,как на автомобиле, совместно со всей кинематической цепью привода (низкочастотные резонансные колебания 1-го порядка), так и на испытательном стенде (высокочастотные резонансные колебания 2-го порядка коленчатого вала).

Типы двигателей с возвратно-поступательным движением поршней

Двигатели внутреннего сгорания характеризуются большим разнообразием конструкций, выбор которых зависит от применения двигателя. В частности, существует много вариантов расположения цилиндров.

Варианты расположения цилиндров

В принципе, можно представить себе огромное количество вариантов расположения цилиндров. Некоторые из них продемонстрировали свою особенную эффективность в автомобилестроении (см. рис. 14).

Двигатели с радиальным расположением цилиндров, вследствие своей большой высоты, непригодны для использования на автомобилях.

Важно отметить различия между двигателем с оппозитным расположением цилиндров и V-образным двигателем с углом 180° между отдельными блоками цилиндров. В двигателе с оппозитным расположением цилиндров поршни противоположных цилиндров всегда движутся в противоположных направлениях, благодаря чему силы инерции уравновешивают друг друга. В V-образном двигателе поршни противоположных цилиндров всегда движутся в одном направлении.

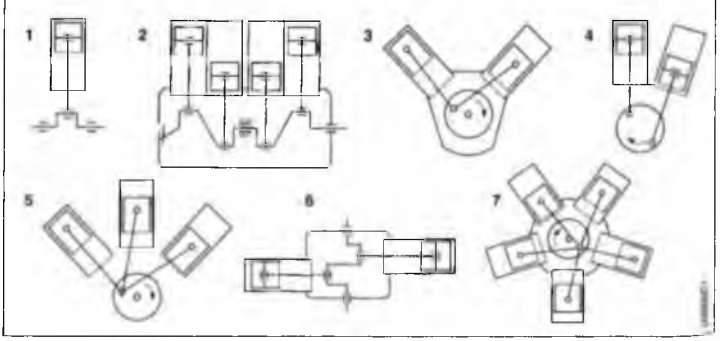
Важно также отметить конструкции V-образного и W-образного двигателей, у которых соединение шатунов с коленчатым валом (большая головка шатуна) соответствующих цилиндров выполнено с немного смещенными относительно друг друга шатунными шейками.

В многопоршневых агрегатах сжатие обычно осуществляется несколькими рабочими поршнями. В U-образном двигателе поршни совершают приблизительно параллельное движение. В двигателе с оппозитным расположением цилиндров поршни совершают движения в противоположных направлениях. Варианты двигателей с более чем одним поршнем на одну камеру сгорания не нашли применения. Их вес и размеры делают их непригодными для использования в автомобилестроении.

Определения

В соответствии со стандартом DIN 73021 [2] направление вращения автомобильных двигателей определяется, если смотреть со стороны носка коленчатого вала. Для ДВС общего назначения и судовых двигателей направление вращения определяется, если смотреть со стороны выходного конца коленчатого вала (стандарты ISO 1204 [3] и 1205, ISO 1205, DIN 6265).

Рис. 14. Типы поршневых двигателей:
1 – одноцилиндровый двигатель (отдельный цилиндр), 2 – рядный двигатель (с расположением отдельных цилиндров в линию); 3 – V-образный двигатель (с расположением отдельных цилиндров двумя блоками, V-образная компоновка); 4 – двигатель VR-типа (с расположением отдельных цилиндров двумя блоками, V-образная компоновка, два блока сближены друг к другу); 5 – W-образный двигатель (с тремя блоками, W-образная компоновка); 6 – оппозитный двигатель (с расположением отдельных цилиндров напротив друг друга); 7 – адиальный двигатель (с радиальным расположением цилиндров в одной или более плоскостях)



Вращение по часовой стрелке
Направление по часовой стрелке определяется, глядя со стороны носка коленчатого вала.

Вращение против часовой стрелки
Направление против часовой стрелки определяется, глядя со стороны носка коленчатого вала.

Нумерация цилиндров
Цилиндры нумеруются последовательно (1, 2, 3, и т.д), в том порядке, в котором они пересекались бы воображаемой горизонтальной плоскостью. Нумерация должна начинаться от носка коленчатого вала. При двухрядном расположении цилиндров нумерация начинается слева, если смотреть со стороны носка коленчатого вала (см. рис. ниже). Цилиндр 1 должен быть промаркирован номером 1.

Порядок зажигания
Порядок зажигания – это последовательность моментов воспламенения рабочей смеси в цилиндрах двигателя. При его выборе учитывают конструкцию двигателя, равномерность промежутков между зажиганием, трудоемкость изготовления коленчатого вала, оптимальность нагрузок на коленчатый вал и т.п.

Конструкция коленчатого вала

Кинематика привода коленчатого вала

Кинематика привода коленчатого вала (для одного цилиндра) может быть определена из геометрического расположения осей поршня и поршневого пальца, шатуна и коленчатого вала (радиус коленчатого вала равен половине рабочего хода поршня) (см. рис. 15). Если ход поршня x в верхней мертвой точке принять равным нулю, при радиусе кривошипа r и длине шатуна l получаем (см. рис. 16):

$$x = r\,(1 - \cos\alpha) + l\,(1 - \cos\beta),$$

где

$r \sin\alpha = l \sin\beta$

и

$\lambda = r/l.$

Получаем следующее:

$$x = r\left(1 - \cos\alpha + \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\alpha}\right)\right).$$

Некоторые производители применяют компоновку со смещенным поршневым пальцем. За счет изменения положения поршня и в зависимости от положения шатуна можно ожидать снижения трения и уровня шума. Смещение может осуществляться путем сдвига поршневого пальца относительно центрального положения или смещения коленчатого вала.
Если принять смещение для положительных углов поворота коленчатого вала положительным и ввести величину

Рис. 15. Кривошипно-шатунный механизм поршневого двигателя (принцип действия):
1 – клапанный газораспределительный механизм;
2 – поршень;
3 – шатун;
4 – коленчатый вал

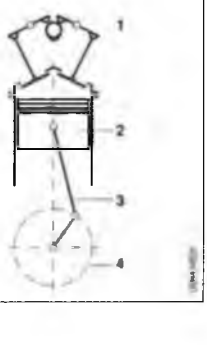
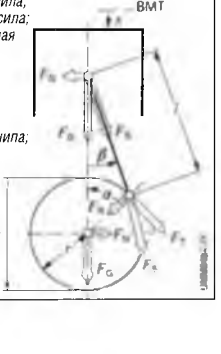


Рис. 16. Разложение на составляющие силы, воздействующей на поршень:
F_G *– сила, воздействующая на поршневой палец (давление газов);*
F_S *– сила, воздействующая на шатун;*
F_R *– радиальная сила;*
F_N *– нормальная сила;*
F_T *– тангенциальная сила;*
α *– угол поворота коленчатого вала;*
β *– угол качания шатуна;*
r *– радиус кривошипа;*
l *– длина шатуна;*
h *– полный ход поршня;*
x *– ход поршня (начало в ВМТ)* $h = 2r$



$\delta = \frac{\text{смещение}}{\text{длина шатуна}}$,
это дает следующее соотношение для хода поршня:

$$x = r\left(1 - \cos\alpha + \frac{1}{\lambda}\left(1 - \sqrt{1 - (\lambda\sin\alpha - \delta)^2}\right)\right).$$

На рис. 17 показано влияние отношения хода поршня к длине шатуна и смещения. Однако различия по сравнению с нормальными значениями смещения в миллиметровом диапазоне ($\delta < 0{,}04$), заметно меньше.

Преобразуя корневую функцию в ряд Тэйлора (при значениях хода около $x = 0$: в ряд Маклорена) и заменяя степени тригонометрических функций полигармоническими функциями, можно получить следующее выражение [4]:

$$x = r\left[1 + \frac{1}{4}\lambda + \frac{3}{64}\lambda^3 + \ldots - \cos\alpha\right.$$
$$-\left(\frac{1}{4}\lambda + \frac{3}{64}\lambda^3 + \ldots\right)\cos 2\alpha$$
$$\left.+\left(\frac{3}{64}\lambda^3 + \ldots\right)\cos 4\alpha + \ldots\right].$$

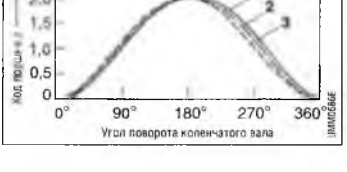
Это выражение демонстрирует присутствие высших гармоник, обусловленных кинематикой привода коленчатого вала, которые также называются колебаниями двигателя высшего порядка (кратные частоты вращения коленчатого вала).

Поскольку нормальные значения λ составляют около 0,3, членами λ высшего порядка можно пренебречь и в дальнейших расчетах использовать следующее упрощенное выражение:

$$x = r\left[1 + \frac{1}{4}\lambda - \cos\alpha - \frac{1}{4}\lambda\cos 2\alpha\right].$$

Однако это упрощение не может быть использовано, если необходимо выполнить детальный анализ вибрации и резонанса.

Рис. 17. График зависимости положения поршня от угла поворота коленчатого вала:
1 – $\lambda_P = \infty$;
2 – $\lambda_P = 0{,}3$;
3 – $\lambda_P = 0{,}3$, $\delta = 0{,}1$



Из упрощенного уравнения получаются следующие соотношения для скорости поршня v и ускорения поршня a, где была введена угловая скорость $d\alpha/dt = \omega = 2\pi n$ (n частота вращения):

$$v = r\omega\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha\right),$$
$$a = r\omega^2\left(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha\right).$$

Здесь также имеют место высшие гармоники, которые не следует игнорировать при исследовании явлений резонанса.

Динамика коленчатого вала

Силы, воздействующие на узел коленчатого вала, и результирующие моменты первоначально можно определить следующим образом без учета сил инерции (рис.16).

Сила на поршневом пальце возникает под действием давления газов в камере сгорания, передающегося на поршень. Имеет место следующее:

$$F_G = (p - p_{KGH})\,A_{piston}.$$

Сила на шатуне определяется посредством векторного анализа силы на поршневом пальце в направлении шатуна. Имеет место следующее:

$$F_S = \frac{F_G}{\cos\beta} = \frac{F_G}{\sqrt{1 - \lambda^2\sin^2\alpha}}.$$

Нормальная сила поршня F_N - это векторная составляющая силы на поршневом пальце, перпендикулярная к стенке цилиндра и уравновешивающая силу на шатуне:

$$F_N = F_G\tan\beta = \frac{F_G\lambda\sin\alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2\sin^2\alpha}}.$$

Эта сила вносит значительный вклад в создание трения между поршнем и стенкой цилиндра. Сторона, с которой соприкасается поршень после верхней мертвой точки под действием давления газов, называется большой упорной поверхностью, а противоположная сторона – малой упорной поверхностью. Следовательно, наибольшее трение имеет место вскоре после прохождения ВМТ на большой упорной поверхности.

Тангенциальная сила на шатунной шейке коленчатого вала вызывает ускорение коленчатого вала и, следовательно, увеличение крутящего момента коленчатого вала. Она определяется путем векторного анализа силы на шатуне:

$$F_T = \frac{F_G \sin(\alpha+\beta)}{\cos\beta}$$

$$= F_G\left(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha/\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}\right).$$

Подкоренное выражение может быть упрощено следующим образом:

$$F_T \approx F_G\,(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha)\,.$$

Радиальная сила F_R на шатунной шейке коленчатого вала:

$$F_R = F_G\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta}$$

$$= F_G\left\{\cos\alpha + \lambda\frac{\sin^2\alpha}{\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}}\right\}$$

или приблизительно

$$F_R \approx F_G\,(\cos\alpha - \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}\cos 2\alpha)\,.$$

Силы инерции можно разделить на колебательные и вращательные составляющие. Массы поршня, поршневых колец и поршневого пальца m_K относятся к колебательной составляющей и могут быть виртуально сосредоточены в поршневом пальце.

Щека коленчатого вала с шатунной шейкой относятся к вращательной составляющей. Здесь масса обычно сосредотачивается на радиусе кривошипа, на центральной оси шатунной шейки. Применимо следующее:

$$m_W = \sum\frac{m_i\, r_{si}}{r},$$

где m_i – масса соответствующего компонента (щека, палец и т.д.), а r_{si} – соответствующий радиус центра массы.

В связи с колебательным движением шатуна целесообразно разделить массу шатуна на колебательную и вращательную составляющие. Это может быть сделано, если известно точное положение центра тяжести и момента инерции шатуна, предполагая наличие двух динамически идентичных отдельных масс малой и большой головок шатуна, и определяя условие равновесия сил, моментов и инерционных масс. Обычно предполагается, что одна треть массы шатуна m_{Pl} является колебательной, а две трети - вращательной. Затем при $m_0 = m_K + 1/3\, m_{Pl}$, как колебательной массы и соответствующем ускорении поршня (см. ниже) колебательная сила инерции выражается как:

$$F_0 \approx m_0\, r\,\omega^2\,(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha),$$

Таким образом, колебательная сила инерции возрастает пропорционально квадрату частоты вращения двигателя ($\omega = 2\pi n$) и имеет составляющую первого порядка и меньшую составляющую второго порядка.

Вращательная сила инерции выводится, как центробежная сила из уменьшенной массы $m_r = m_W + 2/3\, m_{Pl}$ и скорости вращения как:

$$F_r = m_r\, r\,\omega^2\,.$$

Точно так же вращательная сила инерции возрастает пропорционально квадрату частоты вращения двигателя, но не имеет составляющих высших порядков. Вращательная сила инерции, следовательно, может быть легко уравновешена противовесами, вращающимися со скоростью, равной частоте вращения двигателя. Неравномерности вращения коленчатого вала столь малы по сравнению с этими силами, что в балансе масс ими можно пренебречь.

Как было показано выше в кинематике узла коленчатого вала, высшие гармоники (колебания высшего порядка) возникают за счет геометрии кривошипно-шатунного механизма. Амплитуда колебаний 4-го и выше порядков быстро снижается, и в балансе масс этими колебаниями, как правило, пренебрегают.

Уравновешивание масс в одноцилиндровом двигателе

Компонент вращающейся массы в одноцилиндровом двигателе может быть полностью уравновешен при помощи соответствующего противовеса. Противовесы обычно предусматриваются на обеих сторонах, и массы должны быть сбалансированы относительно радиуса вращения центра масс. Колебания сил можно представить в виде векторов силы (рис. 18), когда они моделируются как вращающиеся в противоположных направлениях, и имеющие в каждом случае половинную величину.

Следовательно, для уравновешивания колебательных сил инерции могут быть использованы два вращающихся в противоположном направлении вала. Горизонтальная составляющая исчезает и, как минимум составляющая колебательной силы инерции первого порядка может быть скомпенсирована.

Для практически полного уравновешивания масс требуются дополнительные уравновеши-

вающие валы, которые должны вращаться со скоростью в два раза выше частоты вращения двигателя, чтобы полностью уравновесить составляющую колебаний второго порядка.

Часто конструкторам приходится идти на компромисс вследствие того, что системы с противоположно вращающимися валами являются дорогостоящими, и уже для уравновешивания сил инерции первого порядка требуются значительные массы. Например, масса противовеса может быть равна половине колеблющейся массы. При этом неуравновешенные силы инерции, действующие наружу в направлении продольной оси цилиндра, уменьшаются наполовину, однако за счет больших масс вращающихся компонентов возникают поперечные силы (см. табл. 2). Такая частичная компенсация называется 50%-ной балансировкой. Обычными цифрами являются 100 % уравновешивание вращающихся масс и 50 % уравновешивание колеблющихся масс.

Уравновешивание масс в многоцилиндровых двигателях

В многоцилиндровом двигателе силы инерции состоят из сил инерции каждого отдельного цилиндра, которые накладываются друг на друга. Кроме того, за счет промежутков между цилиндрами создаются неуравновешенные моменты инерции. Все возможные поперечные и продольные отклоняющие моменты и неуравновешенные силы инерции показаны в табл. 3.

Взаимное уравновешивание сил инерции является одним из главных факторов, определяющих выбор конфигурации коленчатого вала, а следовательно, и конструкции самого двигателя. В многоцилиндровых двигателях силы инерции могут быть уравновешены, если общий центр тяжести всех деталей кривошипно-шатунного механизма располагается в средней точке коленчатого вала, т.е., если коленчатый

Рис. 18. Полностью уравновешенные массы 1-го и 2-го порядков

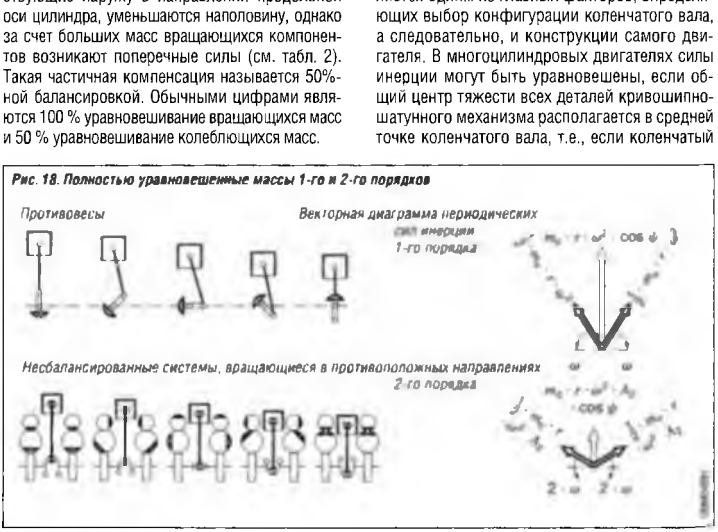


Таблица 2. Уравновешивание масс в одноцилиндровом двигателе, в зависимости от степени уравновешивания

		Степень уравновешивания		
		0 %	50 %	100 %
Размер противовеса	$m_{G} \triangleq$	m_1	$m_1 + 0{,}5m_0$	$m_1 + m_0$
Остаточная сила инерции (z) 1-го порядка	$F_{1z} =$	$m_0 \cdot r \cdot \omega^2$	$0{,}5 \cdot m_0 \cdot r \cdot \omega^2$	0
Остаточная сила инерции (y) 1-го порядка	$F_{1y} =$	0	$0{,}5 \cdot m_0 \cdot r \cdot \omega^2$	$m_0 \cdot r \cdot \omega^2$

вал является симметричным (глядя спереди). Это представлено полярными диаграммами сил 1-го и 2-го порядка (см. табл. 4).

Диаграмма 2-го порядка для четырехцилиндрового рядного двигателя является асимметричной, указывая на то, что этот порядок характеризуется наличием больших неуравновешенных сил инерции. Эти силы могут быть уравновешены двумя балансирными валами, вращающимися в противоположных направлениях, но с удвоенной частотой (система Ланчестера).

В табл. 5 приведена сводка неуравновешенных сил и моментов для различного числа цилиндров и конфигураций кривошипно-шатунных механизмов.

Крутящая сила

Массы в двигателе движутся с постоянно изменяющимся ускорением, что приводит к возникновению сил инерции. Циклически изменяющиеся давления в цилиндрах называются силами газообразных продуктов сгорания смеси. Те и другие силы по отношению к двигателю имеют как внутренние, так и внешние составляющие. Внутренние силы и моменты должны поглощаться компонентами двигателя, в особенности коленчатым валом и картером двигателя, в то время как внешние силы через опоры двигателя передаются на шасси автомобиля.

На поршень действуют циклические усилия, создаваемые при сгорании топливовоз-

Таблица 3. Поперечные и продольные отклоняющие моменты и неуравновешенные силы инерции в многоцилиндровых двигателях

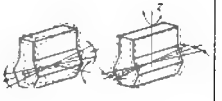
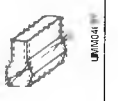
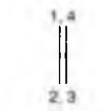
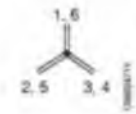
Силы и моменты в двигателе				
Название	Переменный крутящий момент, поперечный опрокидывающий момент, реактивный крутящий момент	Неуравновешенные силы инерции	Неуравновешенные моменты инерции, продольный опрокидывающий момент вокруг оси y (поперечная ось), момент «продольной качки» вокруг оси z (вертикальной оси)	Внутренний изгибающий момент
Причина	Тангенциальные составляющие силы давления газов, тангенциальные силы инерции 1, 2, 3 и 4-го порядков	Несбалансированные колебательные силы инерции 1-го порядка в 1-ом и 2-ом цилиндрах; 2-го порядка в 1-ом, 2-ом и 4-ом цилиндрах	Несбалансированные колебательные силы инерции, как составляющие сил 1-го и 2-го порядка	Вращательные и колебательные силы инерции
Конструктивные факторы	Количество цилиндров, интервалы зажигания, рабочий объем, p_i, ε, p_z, m_0, r, ω, λ	Количество цилиндров, конфигурация кривошипно-шатунного механизма, m_0, r, ω, λ	Количество цилиндров, конфигурация кривошипно-шатунного механизма, расстояние между цилиндрами, размер противовесов оказывают влияние на величину моментов сил инерции вокруг осей y и z, m_0, r, ω, λ, a	Количество кривошипов, конфигурация кривошипно-шатунного механизма, длина двигателя, жесткость блока цилиндров
Методы устранения	Могут быть скомпенсированы только в исключительных случаях	Влияние неуравновешенных масс может быть исключено при помощи вращающихся балансировочных систем, однако это решение является технически сложным и применяется редко; поэтому предпочтительно размещать кривошипы в определенной последовательности без изменения массы или с ограниченным воздействием на массу		Противовесы, жесткий блок цилиндров
	Защита посредством установки упругих опор двигателя (в особенности для гашения сил высших порядков (≥ 2))			

Таблица 4. Полярная диаграмма сил для рядных двигателей

	Трехцилиндровый двигатель	Четырехцилиндровый двигатель	Пятицилиндровый двигатель	Шестицилиндровый двигатель
Порядок расположения кривошипов				
Полярная диаграмма сил 1-го порядка				
Полярная диаграмма сил 2-го порядка				

душной смеси, а циклические инерционные усилия действуют на поршень, шатун и коленчатый вал. Все эти силы в сумме создают тангенциальную составляющую силы, действующую на шейку коленчатого вала. Эта сила, умноженная на радиус кривошипа, дает крутящий момент, также изменяющийся по периодическому закону.

В многоцилиндровых двигателях кривые тангенциального давления для отдельных цилиндров суммируют в соответствии с числом цилиндров двигателя, их расположением, конструкцией коленчатого вала и порядком работы цилиндров. Полученная результирующая кривая является характеристикой двигателя (с точки зрения его конструкции) и включает весь рабочий цикл (т.е., для четырехтактных двигателей два оборота коленчатого вала) (см. рис. 18). Этот процесс можно проиллюстрировать диаграммой крутящих сил. Эта переменная крутящая сила и результирующий крутящий момент, в зависимости от момента инерции J, создают переменную скорость вращения ω:

$$d\omega/dt = M(t)/J$$

с учетом всех наложенных и вновь созданных порядков колебаний (в том числе половинных порядков). Это отклонение от постоянной скорости вращения называется коэффициентом циклического изменения скорости вращения и определяется следующим образом:

$$\delta_S = (\omega_{max} - \omega_{min}) / \omega_{min}.$$

Этот коэффициент циклического изменения может быть уменьшен до приемлемого уровня при помощи механизмов, запасающих энергию, таких как, например, маховики. Крутильные колебания, которые можно отследить назад к описанным выше крутящим силам, также называются крутильными колебаниями 1-го порядка. Эти колебания нельзя смешивать с высокочастотными колебаниями, возникающими вследствие упругих деформаций и собственного резонанса коленчатого вала (см. ниже), называемыми колебаниями 2-го порядка.

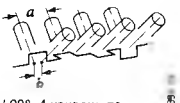
Таблица 5. Неуравновешенные силы и моменты 1-го и 2-го порядка и интервалы между моментами зажигания для наиболее распространенных конструкций двигателей

$F_1 = m_1 r \omega^2, \quad F_1 = m_0 r \omega^2 \cos\alpha \quad F_2 = m_0 r \omega^2 \lambda \cos 2\alpha$

Расположение цилиндров и число кривошипов	Неуравновешенные силы 1-го порядка [1]	Неуравновешенные силы 2-го порядка	Неуравновешенные моменты 1-го порядка [1]	Неуравновешенные моменты 2-го порядка	Интервалы между моментами зажигания
Трехцилиндровый двигатель					
 Рядный, 3 кривошипа	0	0	$\sqrt{3}\ F_1\ a$	$\sqrt{3}\ F_2\ a$	240°/240°
Четырехцилиндровый двигатель					
 Рядный, 4 кривошипа	0	$4\ F_2$	0	0	180°/180°
 Двигатель с оппозитным расположением цилиндров, 4 кривошипа	0	0	0	$2\ F_2\ b$	180°/180°
Пятицилиндровый двигатель					
 Рядный, 5 кривошипов	0	0	$0{,}449\ F_1\ a$	$4{,}98\ F_2\ a$	144°/144°
Шестицилиндровый двигатель					
 Рядный, 6 кривошипов	0	0	0	0	120°/120°

[1] Без противовесов

Таблица 5 (продолжение). Неуравновешенные силы и моменты 1-го и 2-го порядков и интервалы между моментами зажигания для наиболее распространенных конструкций двигателей

Расположение цилиндров и число кривошипов	Неуравновешенные силы 1-го порядка [1]	Неуравновешенные силы 2-го порядка	Неуравновешенные моменты 1-го порядка	Неуравновешенные моменты 2-го порядка	Интервалы между моментами зажигания
Шестицилиндровый двигатель (продолжение)					
 V 90°, 3 кривошипа	0	0	$\sqrt{3} \cdot F_1 \cdot a$ [2]	$\sqrt{6} \cdot F_2 \cdot a$	150°/90° 150°/90°
 Нормальная балансировка V 90°, 3 кривошипа, угол смещения кривошипов 30°	0	0	$0{,}4483 \cdot F_1 \cdot a$	$(0{,}966 \pm 0{,}256) \cdot \sqrt{3} \cdot F_2 \cdot a$	120°/120°
 Двигатель с оппозитным расположением цилиндров, 6 кривошипов	0	0	0	0	120°/120°
 V 60°, 6 кривошипов	0	0	$3 \cdot F_1 \cdot a/2$	$3 \cdot F_2 \cdot a/2$	120°/120°
Восьмицилиндровый двигатель					
 V 90°, 4 кривошипа в двух плоскостях	0	0	$\sqrt{10} \cdot F_1 \cdot a$ [2]	0	90°/90°
Двенадцатицилиндровый двигатель					
 V 60°, 6 кривошипов	0	0	0	0	60°/60°

[1] Без противовесов, [2] может быть полностью уравновешен при помощи противовесов

Трибология и трение

Поршень, поршневые кольца и стенки цилиндра представляют собой замкнутую и очень сложную трибологическую систему. Это также относится к поршневому пальцу и подшипникам скольжения коленчатого вала. Ввиду постоянно изменяющихся как по величине, так и по направлению сил, требуется детальное моделирование этой системы.

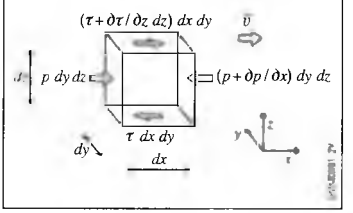
Чтобы обеспечить приемлемую износостойкость, необходимо создать гидродинамическую пленку смазочного материала, толщина которой больше высоты шероховатостей двух контактирующих поверхностей (см. также «Кривая Штрибека»). Масляная пленка либо уже присутствует в зазоре (подшипника скольжения с принудительной подачей смазочного масла), либо должна быть создана динамически в виде «масляного клина» (скошенное поршневое кольцо в гильзе цилиндра). Однако, этот масляный клин всегда разрушается, когда относительная скорость перемещения поверхностей становится равной нулю. Что касается поршневых колец и стенок цилиндра, это происходит в момент изменения направления движения на противоположное (в верхней и нижней мертвых точках), а для поршневого пальца – между этими положениями. Поэтому, во избежание заклинивания и преждевременного износа, важно обеспечить также наличие достаточного объема, в котором смазочное масло будет удерживаться между контактными поверхностями за счет сил сцепления в течение этих кратковременных остановок. В трибологической системе, для поршня – это хонингованная поверхность гильзы цилиндра, а для поршневого пальца – форма втулок.

Еще Ньютон установил, что сила трения между двумя соседними элементами масляной пленки практически не зависит от приложенного давления и пропорциональна только разности скоростей двух элементов (скорости скольжения).

$$\tau = \eta \, dv/dz.$$

$\tau = F/A$ – напряжение сдвига;
F – сила сдвига;
A – площадь поверхности контакта;
v – скорость скольжения;
z – направление координаты, перпендикулярной к направлению скорости v.

Рис. 19. Силы давления в одномерной модели напряжений



Иногда также используется такой параметр, как кинематическая вязкость v. Она равна динамической вязкости, деленной на плотность, и определяется соотношением:

$$v = \eta/p \text{ [м}^2\text{/с]}$$

Динамическая вязкость η [Н·с/м^2 или Па·с] резко уменьшается с ростом температуры, Поэтому важно, чтобы при данной температуре вязкость масла η обеспечивала напряжение сдвига, достаточное для поддержания масляной пленки. Необходимо также обеспечить достаточную относительную скорость перемещения поверхностей контакта v. Из формулы видно, что гидродинамическое напряжение сдвига становится равным нулю в точках изменения направления движения поршня или поворота малой головки шатуна относительно поршневого пальца. Следует также указать, что толщина смазочной пленки Δy не должна быть слишком большой, поскольку в этом случае напряжение сдвига становится слишком малым, что приводит к разрыву смазочной пленки.

Условие равновесия сил для упрощенного случая одномерного состояния напряжений в направлении x (рис. 19) демонстрирует, что должно иметь место соотношение $\partial p/\partial x = \partial\tau/\partial z$ и, таким образом, $\partial p/\partial x = \eta \, \partial^2 v/\partial z^2$. Это демонстрирует, что величина падения давления потока зависит от вязкости и скорости. В дополнение к этому может быть выведен профиль скорости.

В соответствии с условием сцепления, которое указывает, что скорость движения масляной пленки на стенке равна скорости движения стенки, можно определить распределение скорости (линейное для ламинарного потока) и распределение давления в зазоре (см. «Подшипники скольжения»).

При помощи (термо-)эластогидродинамического моделирования (EHD, эластогидродинамика) были сделаны попытки определить толщину пленки смазочного материала путем решения математических уравнений для многомерного случая, для определения условий массового баланса и равновесия моментов.

- Баланс масс: масса поступающего масла и количество масла, выходящего через зазор, должны быть равны.
- Равновесие моментов: равновесие сил прямой нагрузки (давления подаваемого масла), напряжения сдвига (вызванного вязкостью масла), включая кажущиеся напряжения внутреннего трения, вызванные турбулентностью потока и силами инерции (составляющая ускорения).

Для решения проблемы течения были использованы системы дифференциальных уравнений Рейнольдса или Навье-Стокса. При помощи моделирования методом конечных элементов были также учтены деформации подшипников, и эта сложная система уравнений была решена в числовом виде.

Надлежащая подача масла в подшипники должна быть обеспечена потому, что давление масла в подшипниках (> 100 бар) обычно значительно превышает статическое давление, создаваемое масляным насосом (< 10 бар). Это достигается при помощи смазочных отверстий малого диаметра и специальных канавок в подшипниках скольжения, или за счет начальных сил, создаваемых поршневыми кольцами.

Также предпринимались попытки моделирования случая смешанного трения. Влияние геометрии поверхности (шероховатости поверхности) на микродинамику течения учитывается при помощи «тензоров течения» в расширенном дифференциальном уравнении Рейнольдса. Используя модели давления контакта шероховатых поверхностей, можно определить пропорции площадей гидродинамического контакта и сплошного контакта и соответствующим образом учесть их. Также ведутся интенсивные работы в области моделирования процесса приработки контактирующих поверхностей. Это в конечном итоге позволит оценить процесс износа.

Поскольку напряжения сдвига, а также силы трения пропорциональны скорости скольжения, доли трения поршня в мертвых точках и трения во втулках поршневого пальца малы. Здесь определяющими являются параметры износа.

Подшипники скольжения

Наиболее распространенными подшипниками в двигателях внутреннего сгорания являются подшипники скольжения. К ним относятся, например, смазываемые маслом коренные и шатунные подшипники коленчатого вала, втулки поршневых пальцев и подшипники распределительного вала (см. раздел «Подшипники скольжения»).

В целях предотвращения заклинивания и обеспечения номального вращения в условиях высоких температур или недостаточной смазки необходимо обеспечить точное давление посадки как разъемных подшипников (коленчатого вала, шатунов), так и неразъемных подшипников (поршневых пальцев, распределительного вала). В то же время необходимо исключить возможность перегрузки материалов.

Смазочный зазор в коренных подшипниках коленчатого вала изменяется под действием постоянно изменяющихся усилий (см. также «Конструкция коленчатого вала»).Эти усилия создают своего рода эффект подкачки, вследствие чего масло в подшипнике постоянно обновляется.

Колебательное движение шатуна вызывает увеличение относительной скорости в смазочном зазоре шатунного подшипника коленчатого вала, когда поршень движется вверх, и ее уменьшение, когда поршень движется вниз. Только это вызывает подкачку масла в зазор для смазки. Кроме того, периодически изменяющиеся усилия, воздействующие на подшипник, вызывают постоянное изменение положения шатуна и, тем самым, способствуют увеличению давления смазочной пленки.

Подшипник малой головки шатуна совершает просто колебательное движение. Поэтому надлежащая подача масла в этот подшипник особенно важна, однако труднодостижима. Избежать смешанного трения здесь практически невозможно. Если конструкция включает плавающий подшипник поршневого пальца, палец совершает пово-

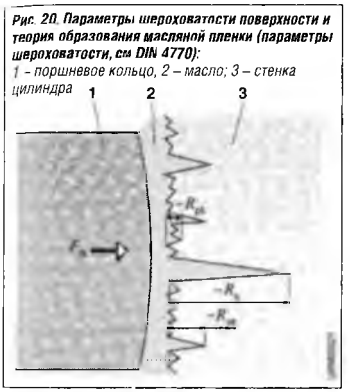


Рис. 20. Параметры шероховатости поверхности и теория образования масляной пленки (параметры шероховатости, см DIN 4770):
1 - поршневое кольцо, 2 – масло; 3 – стенка цилиндра

рот из стороны в сторону на несколько градусов – здесь также должна быть обеспечена надлежащая подача масла.

Масло обычно подается посредством разбрызгивания, а также частично через установочное отверстие или через канавки в шейках коленчатого вала и вертикальное отверстие в шатуне.

Пары качения

В двухтактных двигателях и иногда в качестве подшипников распределительного вала используются шариковые, роликовые или игольчатые подшипники качения (см. «Роликовые подшипники»).

Особым случаем является следящий ролик плунжера топливного насоса высокого давления. Система, состоящая из вращающегося ролика и движущегося кулачка представляет собой пару качения с линейным контактом. Характеристической переменной является контактное давление качения Штрибека:

$$K = \frac{F}{D_1 l_{eff}},$$

F – динамическая нагрузка;
$\varphi = D_1/D$ – коэффициент соприкосновения;
D_1 – эквивалентный диаметр;
D - диаметр ролика;
l_{eff} – эффективная ширина ролика.

Эффективный эквивалентный диаметр D_1 может быть получен из мгновенного радиуса кривизны – радиуса кулачка R_{cam} и радиуса ролика R_{roller}:

$$D_1 = 2\frac{R_{cam}\,R_{roller}}{R_{cam} + R_{roller}},$$

Он учитывает соприкосновение двух тел качения.

Также учитывается напряжение Герца p_{Hertz}:

$$p_{Hertz} = \sqrt{\frac{KE}{2.86}},$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга):

$$E = 2\,E_{cam}\,E_{roller} / (E_{cam} + E_{roller}).$$

Слегка изменив угол наклона ролика по отношению к кулачку, можно обеспечить стабильный масляный клин и непрерывное вращение ролика. Типичным признаком перегрузки пар качения является питтинг. Он возникает вследствие деформации металла на молекулярном уровне и возможного внедрения масла, вызывающего чрезвычайно высокие локальные давления и пластичные деформации или эрозию материала. Тенденцию к питтингу можно уменьшить, применяя более твердые материалы и снижая нагрузку.

Поршневое кольцо и несущая поверхность

Поршневые кольца вместе с несущей поверхностью образуют сложную трибологическую систему. С одной стороны, сила давления, действующая на поршневое кольцо, сильно зависит от давления в цилиндре и, следовательно, от угла поворота коленчатого вала и положения поршня. С другой стороны, поршневые кольца совершают вторичные движения в осевом направлении в своих канавках, что также оказывает значительное влияние на толщину смазочной пленки.

Масло обычно подается на несущую поверхность путем разбрызгивания (масло, вспениваемое коленчатым валом или разбрызгиваемое для охлаждения поршня и смазки поршневого пальца) и возвращается при помощи маслосъемного кольца в виде тонкой пленки. Объем, удерживающий масло, зависит от качества обработки гильзы цилиндра (хонингования). Это качество определяется шероховатостью поверхности (глубиной бороздок) и картиной хонингования (углом пересечения бороздок).

Хонингование несущей поверхности имеет две цели. Во-первых, оно производится для того, чтобы за счет бороздок достаточной глубины масло удерживалось силами сце-

пления в течение достаточно продолжительного времени (рис. 20). Во-вторых, шероховатость поверхности должна быть настолько низкой, чтобы предотвратить ее контакт с поршневым кольцом. Для определения хонингования используются различные параметры шероховатости поверхности; эти параметры стандартизованы на общем уровне в стандарте DIN 4760 [5] и детально в стандарте DIN EN ISO 13565 [6]. Начальный износ и начальное трение определяются значением Rpk («уменьшенная высота вершин», см. DIN 4760 и DIN EN ISO 11562 [7] или DIN EN ISO 13565), однако эта величина очень быстро и значительно уменьшается в процессе приработки (от нескольких микрон до 0,2–0,8 мкм). Значение R_{vk} (от 1,0 до 3,5 мкм) является основным параметром, определяющим объем для удержания масла после приработки деталей. Следует отметить, что после хонингования поверхность представляет собой систему перекрестных бороздок. Эта система образует большое количество сообщающихся друг с другом масляных каналов. При этом масло частично вытесняется из зазора, но такая система позволяет равномерно распределить масляную пленку по поверхности. Большие углы хонингования (углы между перекрещивающимися бороздками) уменьшают количество вытесняемого масла, однако при этом возникает тенденция к образованию задиров вследствие неудовлетворительного распределения масла в осевом направлении. Малые углы вызывают повышенный расход масла. Обычно угол хонингования составляет от 30° до 90°

В любом случае в точках изменения направления движения поршня имеет место смешанное трение. Самое меньшее, что требуется в этих областях, это микрокарманы для масла, которые могут быть образованы путем лазерного хонингования или удаления некоторого количества сплава во время хонингования

Обычно температуры, создаваемые во время сгорания топлива в поршневом двигателе, столь велики, что основная часть масла, находящегося на несущей поверхности, испаряется, а в дизельных двигателях даже сгорает. Это испарение или сгорание является основной причиной расхода масла в современных двигателях внутреннего сгорания.

Для облегчения создания "масляного клина" применяются поршневые кольца специальной формы. Критичным фактором является, с одной стороны, скорость поршня, которая не должна становиться слишком высокой, поскольку в этом случае силы сдвига не будут абсорбировать масло, и произойдет разрыв масляной пленки. С другой стороны точки реверсирования направления движения поршня следует рассматривать, как критичные в отношении износа.

Список литературы

[1] Hütten, H.: Motoren – Technik, Praxis, Geschichte. Motorbuch-Verlag, Штуттгарт, 1997.

[2] DIN 73021: Designation of the rotational direction, the cylinders and the ignition circuits of motorcar engines.

[3] ISO 1204: Reciprocating internal combustion engines – Designation of the direction of rotation and of cylinders and valves in головка блока цилиндров, and definition of right-hand and left-hand in-line engines and locations on an engine.

[4] Bronstein, I.; Semendjajew, K.: Taschenbuch der Mathematik. 7th Edition, Verlag Harri Deutsch, 2008.

[5] DIN 4760: Form deviations; Concepts, Classification system.

[6] DIN EN ISO 13565: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Surfaces having stratified functional properties.

[7] DIN EN ISO 11562: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters.

Эмпирические и расчетные параметры

Сравнительные данные

Рис. 1. Расход топлива:
1 – 200 мг/кВт · ч; 2 – 220 мг/кВт · ч; 3 – 240 мг/кВт · ч; 4 – 260 мг/кВт · ч; 5 – 280 мг/кВт · ч; 6 – 300 мг/кВт · ч; 7 – 350 мг/кВт · ч; 8 – 400 мг/кВт · ч; 9 – 500 мг/кВт · ч

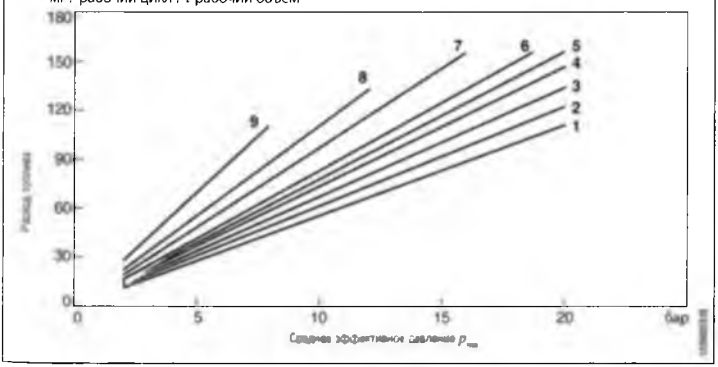
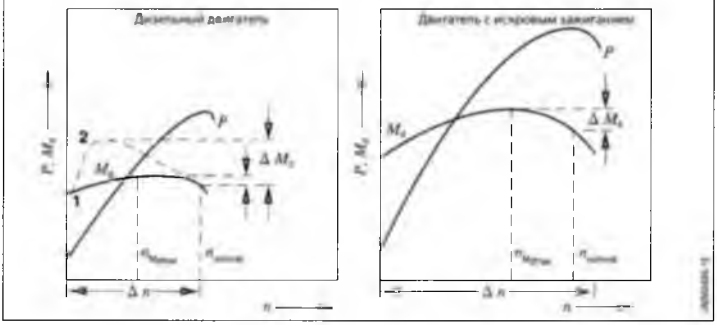


Таблица 1. Сравнительные характеристики двигателей

Тип двигателя/ применение			Частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$	Степень сжатия, ε	Макс. среднее давление, p_e бар	Литровая мощность	Отношение массы двигателя к его мощности, кг/кВт	Удельный расход топлива, г/кВт · ч	Увеличение крутящего момента, %
Двигатели с искровым зажиганием	Автомобили	4-тактный	5000–13000	9–12	9–13	50–150	2,5–0,5	230–280	10–15
	Легковые автомобили	NAE	5000–8000	9–13	11–14	40–80	2,0–0,8	220–270	15–20
		IC/ SCE	5000–7500	9–12	15–22	60–110	1,5–0,5	220–250	20–40
Дизельные двигатели	Легковые автомобили/легкие коммерч. автомобили	NAE	3500–4500	19–24	7–9	20–35	4,0–2,0	220–260	5–10
		SCE/ IC	3500–4500	18–22	12–20	35–55	3,0–1,3	200–220	20–40
	Коммерч. автомобили	SCE/ IC	1800–2600	15–18	18–24	25–40	4,0–2,5	180–210	20–40

NAE – двигатель без наддува; SCE – двигатель с турбонаддувом; IC – двигатель с промежуточным охладителем

Рис. 2. Скоростные характеристики:
1 – двигатель без наддува; 2 – двигатель с турбонаддувом



Точка максимального крутящего момента
Точка кривой частоты вращения двигателя (относительно частоты вращения при максимальной выходной мощности), в которой развивается максимальный крутящий момент, указана в % ($n_{M\,max}/n_{nominal} \cdot 100$).

Рабочий диапазон частот вращения коленчатого вала двигателя
(отношение частоты вращения коленчатого вала при полной нагрузке к номинальной частоте)

Тип двигателя		Рабочий диапазон частоты вращения $\Delta\, n_N$	Точка макс крутящего момента, %
Дизельный двигатель	Легковые автомобили	3,5...5	15...40
	Коммерч. автомобили	1,8 . 3,2	10...60
Двигатель с искровым зажиганием		4 ..7	25.. 35

Увеличение крутящего момента

Тип двигателя		Повышение крутящего момента M_Δ, %
Дизельный двигатель Легковые автомобили	Двигатель без турбонаддува	15 20
	SC [1] + IC [2]	25...35
Дизельный двигатель Коммерч. автомобили	SC [1] + IC [2]	25. 40
Двигатель с искровым зажиганием	Двигатель без турбонаддува	25. 30
	SC [1] + IC [2]	30...35

[1] с турбонаддувом, [2] с промежуточным охлаждением

Мощность двигателя и атмосферные условия

Крутящий момент и, следовательно, выходная мощность двигателя в значительной степени определяются теплосодержанием заряда в цилиндре. В свою очередь на теплосодержание этого заряда напрямую влияет количество воздуха (точнее, кислорода) в заряде. Процессы, происходящие при работе двигателя на режиме полной нагрузки, могут быть рассчитаны в зависимости от параметров окружающего воздуха: температуры, барометрического давления, влажности. При этом частота вращения коленчатого вала или соотношение масс воздуха и топлива в рабочей смеси, объемный к.п.д. и суммарные потери мощности двигателя остаются неизменными. Рабочая смесь становится богаче при повышении атмосферного давления. Только объемный к.п.д. (отношение давления в цилиндре при нахождении поршня в НМТ к давлению окружающего воздуха) остается неизменным для различных атмосферных условий при максимальном открытии дроссельной заслонки. Эффективность сгорания смеси ухудшается в холодном и разреженном воздухе, так как степень испаряемости, турбулентность и скорость сгорания падают. Потери мощности (трение + газообмен + утечки рабочей смеси) снижают индикаторную мощность.

Влияние атмосферных условий
Количество воздуха, всасываемое двигателем, или подаваемое в двигатель турбонагнетателем, зависит от плотности окружающего воздуха. Более холодный, тяжелый и плотный воздух увеличивает мощность двигателя. Эмпирическое правило: при увеличении высоты положения

автомобиля над уровнем моря на каждые 100 м мощность двигателя падает приблизительно на 1 %. Холодный воздух нагревается на несколько градусов перед входом его во впускной трубопровод. При этом снижается плотность воздуха, а, следовательно, и мощность двигателя. Влажный воздух по сравнению с сухим воздухом содержит меньше кислорода – это приводит к снижению мощности двигателя. Правда, такие потери незначительны и могут не учитываться. Большая влажность теплого воздуха в тропическом климате может стать причиной более заметных потерь мощности.

Определение мощности

Эффективная мощность – это мощность, снимаемая с коленчатого вала двигателя. Если измерение выполняется после трансмиссии, необходимо учесть потери в трансмиссии. Номинальная мощность – это гарантируемая изготовителем мощность двигателя на режиме полного дросселя и заданной частоты вращения. Номинальная мощность соответствует эффективной мощности.

Формулы преобразования (см. таблицу ниже) применяются для перевода результатов динамометрических испытаний к нормальным (стандартным) атмосферным условиям, учитывающим влияние на мощностные показатели температуры и давления окружающего воздуха. При помощи этой процедуры плотность воздуха и, следовательно, эффективный объем воздуха в двигателе преобразуется в определенные «стандартные условия» для массы воздуха.

Таблица иллюстрирует наиболее важные стандарты, используемые для коррекции мощности.

Таблица 2. Стандарты для коррекции мощностных параметров (сравнение)

Стандарт (дата публикации)	EEC 80/1269 (4/81)	ISO 1585 (5/82)	JIS D 1001 (10/82)	SAE J 1349 (5/85)	DIN 70 020 (11/76)
Барометрическое давление при испытаниях (* за вычетом давления паров!)					
Сухого воздуха p_{PT}* кПа	99	99	99	99	–
Абсолютное p_{PF} кПа	–	–	–	–	101,3
Температура во время испытаний					
Абсолютная T_a K	298	298	298	298	293
Двигатели с искровым зажиганием без наддува и с турбонаддувом					
Коэффициент коррекции α_a	$\alpha_a = A^{1,2} \cdot B^{0,5}$ $A = 99/p_{PT}$ $B = T_a/298$				$\alpha_a = A \quad B^{0,5}$ $A = 101,3/p_{PF}$ $B = T/293$
Скорректированная мощность: $P_0 = \alpha_a \quad P$ (кВт) (P – измеренная мощность)					
Дизели без наддува, с наддувом/турбонаддувом					
Коэффициент коррекции для учета атмосферных условий f_a	$f_a = A \quad B^{0,7}$ ($A = 99/p_{PT}$, $B = T_a/298$) (двигатели без наддува и с механическим турбонаддувом).				As α_a для бензиновых двигателей
	$f_a = A^{0,7} \quad B^{1,5}$ ($A = 99/p_{PT}$, $B = T_a/298$) (двигатели с турбонаддувом с промежуточным охлаждением/без промежуточного охлаждения)				
Коэффициент коррекции для учета характеристик двигателя f_m	$40 \le q/r \le 65$	$f_m = 0{,}036 \cdot (q/r) - 1{,}14$			$f_m = 1$
	$q/r < 40$	$f_m = 0{,}3$			
	$q/r > 65$	$f_m = 1{,}2$			
$r = p_L/p_E$ – степень повышения давления наддува при абсолютном давлении наддува p_L; p_E – абсолютное давление на входе воздушного компрессора; q – удельный расход топлива (SAE J 1349). для четырехтактного двигателя: $q = 120000\ F/DN$; для двухтактного двигателя $q = 60000\ F/DN$, где F – расход топлива (мг/с); D – рабочий объем ($л$); N - частота вращения коленчатого вала двигателя (мин$^{-1}$)					
Скорректированная мощность: $P_0 = P \quad f_a^m$ (кВт) (P измеренная мощность).					
Обязательное использование вспомогательного оборудования					
Вентилятор,	Да, с электро- или гидроприводным вентилятором				} Не
Контроль за содержанием токсичных веществ в отработавших газах	Да				} определено
Генератор	Да, под нагрузкой				Да
Сервонасосы	Нет				Нет
Кондиционер воздуха	Нет				Нет

Расчет

Величина		Единица измерения
a_k	Ускорение поршня	м/с²
b	Расход топлива	кг/ч; дм³/ч
b_e	Удельный расход топлива	г/кВт · ч
D	Диаметр цилиндра 2 · r	мм
d_v	Диаметр клапана	мм
F	Сила	Н
F_G	Газовая сила в цилиндре	Н
F_N	Боковая сила, действующая на поршень	Н
F_o	Сила инерции при возвратно- поступательном движении	Н
F_r	Сила инерции при вращательном движении	Н
F_S	Сила на шатуне	Н
F_T	Тангенциальная сила	Н
M	Момент силы (крутящий момент)	Н · м
M_o	Колебательные моменты	Н · м
M_r	Крутящие моменты	Н · м
M_d	Эффективный крутящий момент двигателя	Н · м
m_p	Удельная мощность двигателя	кг/кВт
n	Частота вращения коленчатого вала двигателя	мин⁻¹
n_p	Скорость вращения топливного насоса	мин⁻¹
P	Мощность	кВт
P_{eff}	Эффективная мощность [1]	кВт
P_H	Мощность на литр рабочего объема	кВт/дм³
p	Давление	бар
p_c	Давление в конце такта сжатия	бар
p_e	Среднее эффективное давление	бар
p_L	Давление наддува	бар
p_{max}	Пиковое давление впрыска в цилиндре	бар
r	Радиус коленчатого вала	мм
s_d	Площадь сечения отверстия форсунки	мм²
S, s	Рабочий ход, общий	мм
c	Ход поршня	мм
s_l	Такт впуска цилиндра (2-й такт)	мм
s_r	Такт впуска, двухтактный двигатель	мм
S_k	Ход поршня относительно его положения в ВМТ	мм
$S_ö$	Высота окна (для двухтактного двигателя)	мм
T	Температура	°C, K
T_c	Температура в конце такта сжатия	K
T_L	Температура воздуха наддува	K
T_{max}	Пиковая температура в камере сгорания	K
t	Время	с
V	Объем	м³

[1] Эффективная мощность P_{eff} представляет собой мощность двигателя внутреннего сгорания, приводящего в движение все вспомогательное оборудование, необходимое для его работы (например, распределитель зажигания, топливный насос, вытяжной вентилятор, охлаждающий вентилятор, насос охлаждающей жидкости, турбонагнетатель и т.д.) (DIN 1940). Эта мощность называется полезной мощностью двигателя (см. DIN 70 020)

Величина		Единица измерения
V_c	Рабочий объем цилиндра	дм³
V_E	Цикловая подача впрыскиваемого топлива за 1 ход топливного насоса	мм³
V_l	Объем рабочего заряда в цилиндре (для 2-х тактного двигателя)	дм³
V_r	Рабочий объем цилиндра 2-х тактного двигателя	дм³
V_h	Рабочий объем цилиндра	дм³
V_H	Рабочий объем двигателя	дм³
v	Скорость	м/с
v_d	Средняя скорость впрыскивания струи	м/с
v_g	Скорость газового потока	м/с
v_m	Средняя скорость поршня	м/с
v_{max}	Макс скорость поршня	м/с
Z	Число цилиндров двигателя	-
α_o	Время впрыска топлива (в ° поворота вала топливного насоса)	°
β	Угол поворота шатуна	°
ε	Степень сжатия	-
η	Коэффициент полезного действия	-
η_e	Общий к.п.д.	-
η_{th}	Тепловой к.п.д.	-
ν, n	Показатель политропы реальных газов	-
ρ	Плотность	кг/м³
$\varphi.\alpha$	Угол поворота коленчатого вала (φ_o = ВМТ)	°
ω	Угловая скорость вращения	рад/с
λ	= r/l, отношение рабочего хода к длине шатуна	-
λ	Коэффициент избытка воздуха	-
κ	= c_p/c_v, показатель адиабаты идеального газа	-

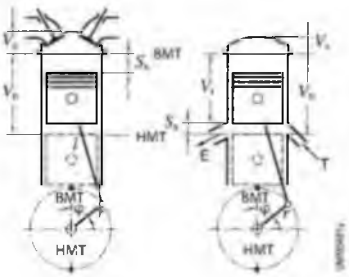
Индексы:

0, 1, 2, 3, 4, 5	Номер цикла/основные параметры
O	Колебание
r	Вращение
1-ый, 2-ой	1-ый порядок, 2-ой порядок
A	Константа
_	Разделение основных значений, производные

Таблицы перевода

1 г/л.с. · ч	= 1,36 г/кВт · ч
1 г/кВт ч	= 0,735 г/л.с · h
1 кгм	= 9, 81 Н · м ≈ 10 Н м
1 Н м	= 0.102 кгс · м ≈ 0,1 кгс · м
1 л.с.	= 0,735 кВт
1 кВт	= 1,36 л.с
1 ат	= 0,981 бар ≈ 1 бар
1 бар	= 1,02 ат ≈ 1 ат

Таблица 3. Расчетные уравнения

Математические соотношения между количественными параметрами	Числовые соотношения между количественными параметрами
Ход поршня Рабочий объем цилиндра $V_h = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot s}{4}$; $V_f = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot s_f}{4}$ (двухтактн. двигатель) Рабочий объем двигателя $V_H = V_h \cdot z$; $V_F = V_f \cdot z$ (двухтактн. двигатель)	$V_H = 0{,}785 \quad 10^{-6} d^2 \cdot s$ V_h в л, d в мм, s в мм $V_H = 0{,}785 \cdot 10^{-6} d^2 \cdot s \cdot z$ V_h в л, d в мм, s в мм
Сжатие Степень сжатия $\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c}$ Давление в конце такта сжатия $p_c = p_0 \quad \varepsilon^{\nu}$ Температура в конце такта сжатия: $T_c = T_0 \quad \varepsilon^{\nu-1}$	
Ход поршня Ход поршня относительно ВМТ $S_k = r \left[1 + \frac{l}{r} - \cos\varphi - \sqrt{\left(\frac{l}{r}\right)^2 - \sin^2\varphi} \right]$ Угол поворота коленчатого вала $\varphi = 2 \cdot \pi \quad n \quad t$ (φ в рад) Скорость поршня (приближенно): $v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \left(\sin\varphi + \frac{r}{2l} \sin 2\varphi \right)$ Средняя скорость поршня $v_m = 2 \quad n \quad s$ Макс. скорость поршня (приближенно, если шатун расположен перпендикулярно к кривошипу коленчатого вала; $\alpha_k = 0$):	**четырехтактный двигатель** **двухтактный двигатель** $\varphi = 6 \quad n \quad t$ φ в °, n в мин$^{-1}$, t в s $v = \frac{n \cdot s}{19{,}100} \left(\sin\varphi + \frac{r}{2l} \sin 2\varphi \right)$ v в м/с, n в мин$^{-1}$, l, r и s в мм $v_m = \frac{n \cdot s}{30{,}000}$ v_m в м/с, n в мин$^{-1}$, s в мм

l/r	3,5	4	4,5
v_{max}	1,63 v_m	1,62 $\cdot$ v_m	1,61 v_m

Ускорение поршня (приближенно): $\alpha_k = 2 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot s \left(\cos\varphi + \frac{r}{l} \cos 2\varphi \right)$	$a = \frac{\pi^2 \cdot s}{182400} \left(\cos\varphi + \frac{r}{l} \cos 2\varphi \right)$ α_k в м/с^2, n в мин$^{-1}$, l, r и s в мм

Переменные могут быть введены в уравнения в любых единицах измерения. Единицы измерения величины, которую необходимо рассчитать, выводятся из единиц измерения, выбранных из условий уравнения. Числовые уравнения действительны только для указанных единиц измерения

Таблица 3. Расчетные уравнения (продолжение)

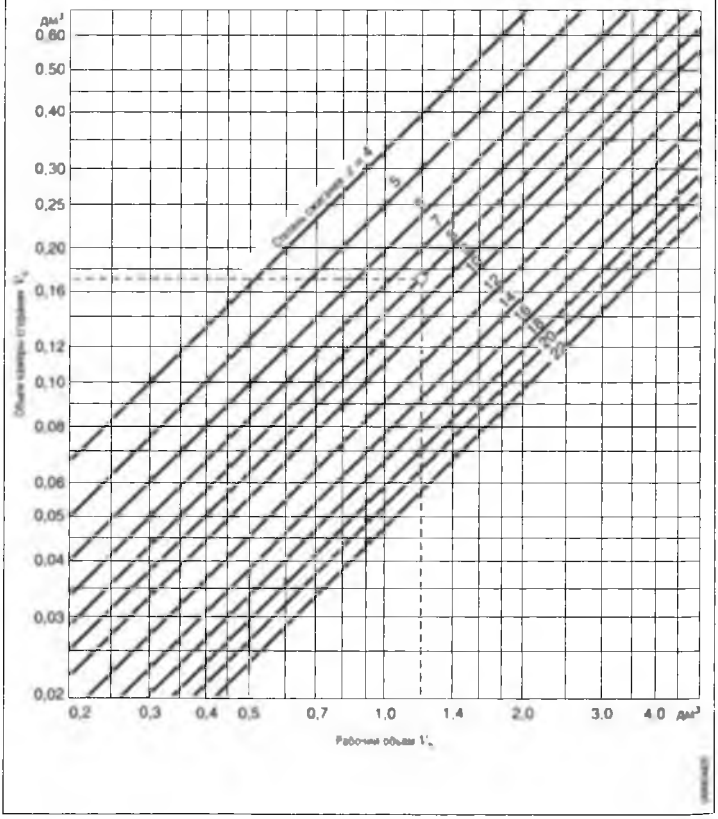
Математические соотношения между количественными параметрами	Числовые соотношения между количественными параметрами
Скорость газового потока Средняя скорость прохождения газа через клапан: $v_g = \frac{d^2}{d_v^2} \cdot v_m$	$v_g = \frac{d^2}{d_v^2} \frac{n \cdot s}{30\,000}$ v_g в м/с, d, d_v, и s в мм, n в мин
Подача топлива Цикловая подача впрыскиваемого топлива за 1 ход топливного насоса: $V_E = \frac{P_{eff} \cdot b_e}{\rho \cdot n_p \cdot z}$ Средняя скорость впрыскивания струи: $v_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_p \cdot V_E}{S_d \cdot \alpha_d}$ (α_d в рад)	$V_E = \frac{1000 \cdot P_{eff} \cdot b_e}{60 \cdot \rho \cdot n_p \cdot z}$ V_E в мм^3, P_{eff} в кВт, b_e в г/кВт · ч (P_{eff} в л.с., b_e в г/л.с. · ч), n_p в мин$^{-1}$, ρ в кг/дм^3 (для топлива $\rho \approx 0{,}85$ кг/дм^3) $v_d = \frac{6 n_p \cdot V_E}{1000 \cdot S_d \cdot \alpha_d}$ v_d = в м/с, n_p в мин, V_E в мм^3, S_d в мм^2, α_d в °
Мощность двигателя $P = M \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n$ $P_{eff} = V_H \cdot p_e \cdot n / K$ K = 1 для двухтактного двигателя K = 2 для четырехтактного двигателя Литровая мощность (мощность на 1 л рабочего объема двигателя): $P_H = \frac{P_{eff}}{V_H}$ Удельная мощность двигателя $m_p = \frac{m}{P_{eff}}$	$P = M \cdot n / 9549$ P в кВт, M в **Н · м** (= Вт · с), $P_{eff} = \frac{V_H \cdot p_e \cdot n}{K \cdot 600} = \frac{M_d \cdot n}{9549}$ P_{eff} в кВт, p_e в бар, n в мин$^{-1}$, M_d в Н · м $P = M \cdot n / 716{,}2$ P в л.с., M в кп · м, n в мин$^{-1}$

Таблица 3. Расчетные уравнения (продолжение)

Математические соотношения между количественными параметрами		Числовые соотношения между количественными параметрами	
Среднее давление на поршень (среднее давление, среднее рабочее давление)			
Четырехтактный двигатель	Двухтактный двигатель	Четырехтактный двигатель	Двухтактный двигатель
$p = \frac{2 \cdot P}{V_H \cdot n}$	$p = \frac{P}{V_H \cdot n}$	$p = 1200 \frac{P}{V_H \cdot n}$	$p = 600 \frac{P}{V_H \cdot n}$
		p в бар, P в кВт, V_H в дм³, n в мин⁻¹	
		$p = 833 \frac{P}{V_H \cdot n}$	$p = 441 \frac{P}{V_H \cdot n}$
		p в бар, P в л.с., V_H в дм³, n в мин⁻¹	
$p = \frac{4 \cdot \pi \cdot M}{V_H}$	$p = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{V_H}$	$p = 0{,}1257 \frac{M}{V_H}$	$p = 0{,}628 \frac{M}{V_H}$
		p в бар, M в Н·м, V_H в дм³	
Эффективный крутящий момент двигателя		$M_d = \frac{V_H \cdot P_e}{0{,}12566}$	$M_d = \frac{V_H \cdot P_e}{0{,}06284}$
$M_d = \frac{V_H \cdot P_e}{4\pi}$	$M_d = \frac{V_H \cdot P_e}{4\pi}$	M_d в Н·м, V_H в дм³, p_e в бар	
		$M_d = 9549 \cdot P_{eff}/n$	
		M_d в Н·м, P_{eff} в кВт, n в мин⁻¹	
Расход топлива		В в л/ч или кг/ч V_B – замеренный объем на динамометрическом испытательном стенде t_b – затраты времени на измерение объемного расхода	
B – часовой расход топлива^ кг/ч $b_e = B/P_{eff}$ $b_e = 1/(H_u \cdot \eta_e)$		$b_e = \frac{V_b \cdot \rho_B \cdot 3600}{t_b \cdot P_{eff}}$	
		ρ_B – плотность топлива в г/см³, t_B в с, V_B в см³, P_{eff} в кВт	
Коэффициент полезного действия		$\eta_e = x/b_e$	
$\eta_{th} = 1 - \varepsilon^{1-\kappa}$ $\eta_e = P_{eff}/(B \cdot H_u)$		где $x = 82$ для $H_u = 44$ $x = 86$ для $H_u = 42$ $x = 90$ для $H_u = 40$ $x = 120$ для $H_u = 30$	
		H_u – Удельная теплотворная способность в МДж/кг b_e – Удельный расход топлива в г/кВт·ч	

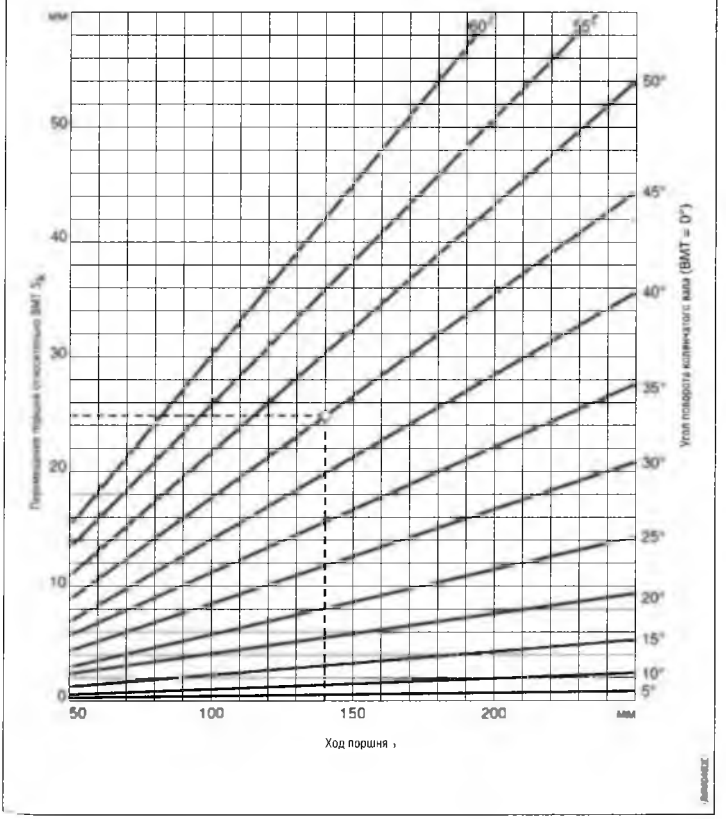
Рис. 3. Рабочий объем и объем камеры сгорания

Приведенная ниже диаграмма применима для определения рабочего объема V_h и объема камеры сгорания V_c отдельного цилиндра и рабочего объема V_H и объема камеры сгорания всего двигателя V_C, соответственно.



Например,
двигатель с рабочим объемом 1,2 л и степенью сжатия ε= 8 имеет объем камеры сгорания 0,17 л.

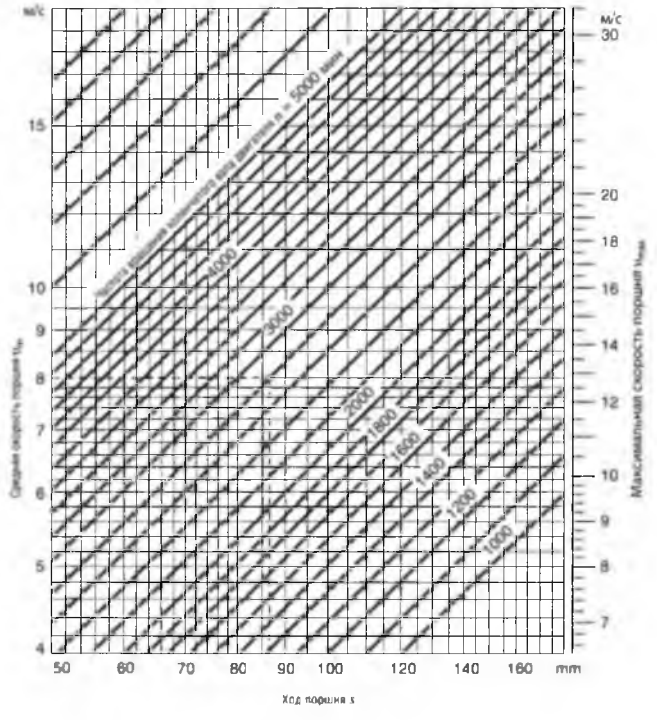
Рис. 4. Ход поршня относительно ВМТ для ряда углов поворота коленчатого вала
Выполнено преобразование угла поворота коленчатого вала к перемещению поршня в мм



Например,
Если ход поршня относительно ВМТ равен 25 мм, то при угле поворота коленчатого вала в 45 ° ход поршня составит 140 мм.

При построении диаграммы принималось значение отношения длины шатуна к радиусу кривошипа $l/r = 4$ (l – длина шатуна, r – радиус кривошипа, равный половине длины хода поршня). Однако, с достаточной степенью точности (ошибка – менее 2 %) значение l/r можно принять равным 3,5–4,5.

Рис. 5. Скорость движения поршня

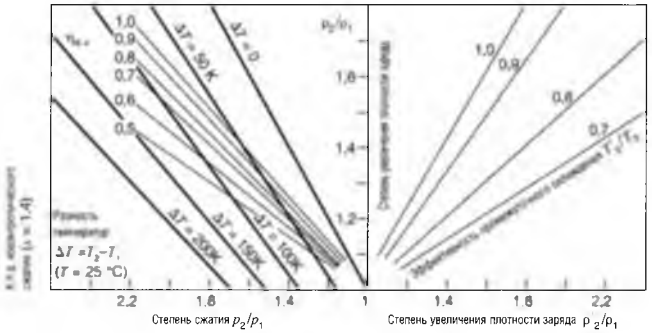


Например,
при ходе поршня s = 86 мм и частоте вращения коленчатого вала n = 2800 мин$^{-1}$ средняя скорость поршня;
v_m = 8 м/с, а максимальная скорость поршня v_{max} = 13 м/с.

Диаграмма построена для v_{max} = 1,62 v_m.

Рис. 6. Увеличение плотности воздуха в цилиндре при наддуве (турбонаддуве)

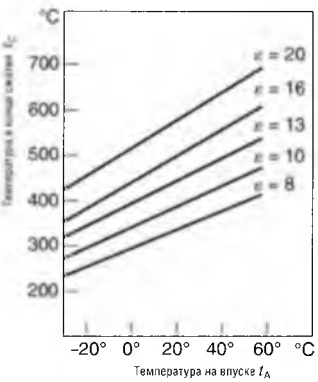
Увеличение плотности заряда при наддуве в зависимости от коэффициента повышения давления в компрессоре, к.п.д. компрессора и эффективности промежуточного охладителя воздуха (IC)



$p_2/p_1 = \pi_c$ – коэффициент повышения давления на стадии предварительного сжатия;
ρ_2/ρ_1 – увеличение плотности; ρ_1 – плотность на входе компрессора;
ρ_2 – плотность на выходе компрессора в кг/м³;
T_2'/T_2 – эффективность промежуточного охладителя; T_2 – температура до промежуточного охладителя воздуха; IC, T_2' – температура после промежуточного охладителя воздуха IC в K;
η_{s-v} – изоэнтропический к.п.д. компрессора

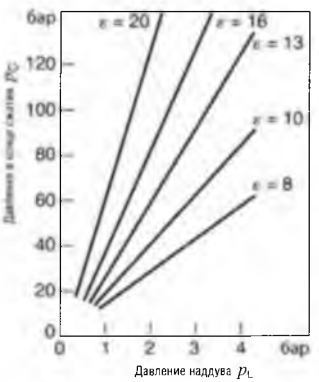
Рис. 7. Давление и температура в конце сжатия

Температура в конце сжатия как функция степени сжатия и температуры на впуске



$t_c = T_c - 273{,}15K$, $T_c = T_A \cdot \varepsilon^{n-1}$, $n = 1{,}35$

Давление в конце сжатия как функция степени сжатия и давления наддува



$p_c = p_L \cdot \varepsilon^n$, $n = 1{,}35$

Роторный двигатель Ванкеля

Роторный двигатель также известен под названием двигателя Ванкеля в честь его изобретателя доктора Феликса Ванкеля. Роторный двигатель в его современном виде описан в стандарте DIN 6261.

Первый прототип роторного двигателя был испытан 25 февраля 1958 года. В настоящее время единственным серийно выпускаемым автомобилем, оснащенным роторным двигателем, является Мазда RX-8.

Конструкция и принцип действия

Ротор двигателя имеет треугольную форму с выгнутыми наружу (выпуклыми) сторонами (рис. 1). Внутри охлаждаемого водой кожуха находится овальная или, точнее, эпитрохоидальной формы камера ротора. При вращении ротора три его вершины обкатываются по стенке корпуса, образуя три взаимно герметизированные камеры с изменяемым рабочим объемом (A, B, C), располагаемые через 120° по дуге окружности. Каждая из этих камер обеспечивает реализацию полного четырехтактного цикла сгорания при каждом полном обороте ротора; т.е. за один полный оборот треугольного ротора двигатель заканчивает четырехтактный процесс три раза, а эксцентриковый элемент осуществляет равное число оборотов.

Передаточное отношение зубчатого колеса с внутренними зубьями и ведущего зубчатого колеса составляет 3 : 2. Следовательно, ротор вращается со скоростью равной одной трети скорости вращения эксцентрикового вала.

Сравнение 4-тактных рабочих циклов роторного двигателя и двигателя с возвратно-поступательным движением поршней

По мере поворота эксцентрикового вала происходит увеличение объема (см. рис. 1, a). Это соответствует движению поршня вниз в двигателе с возвратно-поступательным движением поршней, т.е. такту впуска топливно-воздушной смеси.

По мере продолжения поворота ротора впускной канал соответствующей камеры закрывается (рис. 1, b), и объем газа, находящегося в камере, сжимается. Для двигателя с возвратно-поступательным движением поршней это соответствует перемещению поршня из НМТ в ВМТ при закрытых клапанах. Перетекание газа мимо трохоидального сужения облегчается за счет выемки в основании ротора (b → c).

Незадолго до того, как объем снова начинает увеличиваться, производится зажигание, и начинается процесс сгорания смеси (см. рис. 1, c). Давление газов передается ротором на эксцентриковый вал, что вызывает вращение эксцентрикового вала и ротора. При этом объем камеры снова начинает увеличиваться (c → d). Это соответствует рабочему ходу или такту расширения на двигателе с возвратно-поступательным движением поршня. Здесь эксцентриковый вал выполняет функцию шатунной шейки в двигателе с возвратно-поступательным движением поршней.

Приблизительно в точке достижения максимального объема камеры ротор открывает выпускное отверстие, и начинается выпуск отработавших газов (см. рис. 1, d), что соответствует такту выпуска в двигателе с возвратно-поступательным движением поршней.

В двух других камерах, окружающих ротор, выполняется такая же последовательность со смещением на 120° (относительно ротора). В результате этого процесса за один оборот ротора впуск смеси через впускной канал и выпуск отработавших газов через выпускной канал осуществляется три раза.

Эквивалентный рабочий объем роторного двигателя вычисляется в соответствии со следующим соотношением:

эквивалентный рабочий объем = количество роторов × объем камеры × 2

Направление движения ротора

Движение ротора по трохоидальной поверхности цилиндра направляется:

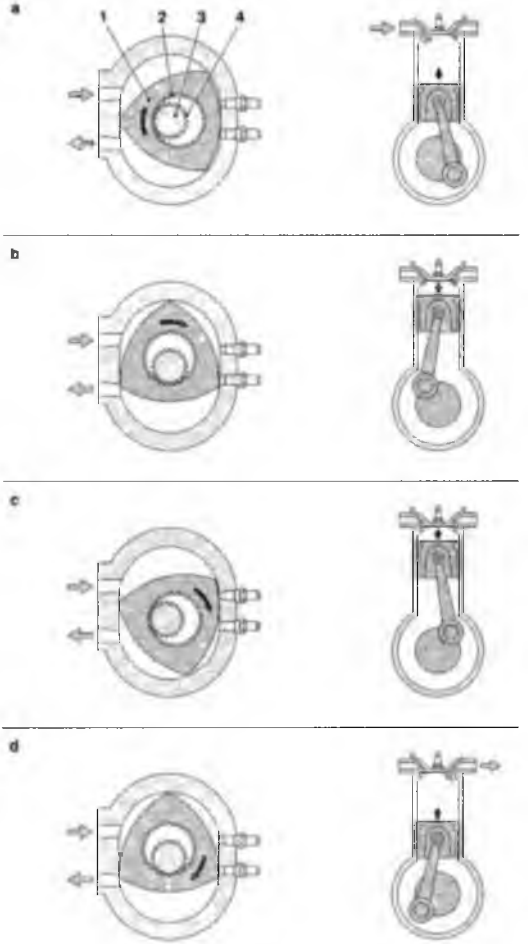
- направляющей шестерней, жестко закрепленной на торцевом щите;
- внутренним зубчатым венцом ротора, который обкатывается вокруг направляющей шестерни;
- эксцентриковым валом, который передает крутящий момент на трансмиссию и, таким образом, эквивалентен коленчатому валу двигателя с возвратно-поступательным движением поршней.

Эксцентриковый вал установлен в подшипниках скольжения в торцевых щитах двигателя и концентрично вращается в направляющей шестерне. Ротор позиционируется на эксцентрике эксцен-

Рис. 1. Сравнение четырех тактов рабочего цикла роторного двигателя и двигателя с возвратно-поступательным движением поршней

Отдельные такты в каждом случае относятся к камере сгорания роторного двигателя, которая на рисунке обозначена белой стрелкой на роторе.

a – такт впуска; b – такт сжатия; c – такт расширения; d – такт выпуска;
1 – ротор; 2 – внутренний зубчатый венец ротора; 3 – эксцентриковый вал ; 4 – направляющая шестерня



трикового вала при помощи подшипников скольжения. В многороторных двигателях на одном эксцентрике установлено несколько роторов. Во время вращения ротор опирается с одной стороны на вращающийся эксцентриковый вал, а с другой стороны опора создается в результате обкатки зубчатым венцом направляющей шестерни. Благодаря такому двойному принудительному направлению ротор может вращаться только в пределах трохоидальной поверхности цилиндра таким образом, что его боковые края, скользя по внутренним стенкам цилиндра, образуют три рабочих камеры.

Ротор изготовлен из литой стали и имеет торцевые и радиальные уплотнительные пластины. Эти пластины изготовлены из литой стали и подвергнуты поверхностной электронно-лучевой обработке. Требуемое давление прижима уплотнительных пластин обеспечивается пластинчатыми пружинами.

В трохоидальной камере для смазки уплотнений установлены маслоразбрызгивающие сопла, подача масла в которые осуществляется дозирующим масляным насосом. Это позволяет точно дозировать подачу масла и снизить расход масла приблизительно на 40 % по сравнению с ранними моделями роторных двигателей.

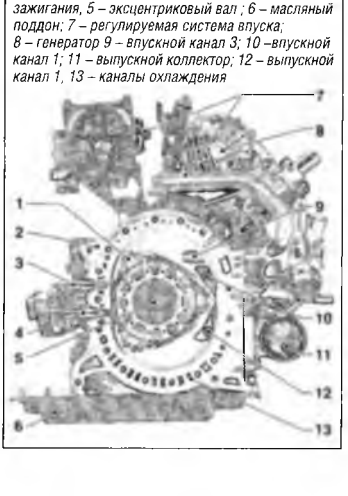


Рис. 2. Роторный двигатель с боковыми впускными и выпускными каналами:
1 – ротор; 2 – корпус ротора; 3 – запаздывающая свеча зажигания; 4 – опережающая свеча зажигания, 5 – эксцентриковый вал ; 6 – масляный поддон; 7 – регулируемая система впуска; 8 – генератор 9 – впускной канал 3; 10 –впускной канал 1; 11 – выпускной коллектор; 12 – выпускной канал 1, 13 – каналы охлаждения

Газообмен

В отличие от двигателя с возвратно-поступательным движением поршней, в котором управление газообменом осуществляется клапанами, в роторном двигателе оно осуществляется отверстиями в роторе. Впускные и выпускные каналы, на предыдущих версиях двигателя расположенные радиально в трохоидальном корпусе ротора (периферийный впуск и выпуск), в последующих разработках были заменены впускными каналами в торцевых щитах. В последних разработках используются боковые впускные и выпускные каналы.

Единственным роторным двигателем, устанавливаемым в настоящее время на серийно выпускаемых легковых автомобилях, является двухроторный двигатель. Он имеет три боковых впускных канала и два боковых выпускных канала для каждого ротора. Боковое расположение каналов газообмена позволяет осуществлять газообмен без перекрытия, что предотвращает перетекание всасываемой свежей смеси со стороны впуска на сторону выпуска. Это дает значительное снижение содержания углеводородов в отработавших газах.

Система впуска

Аналогично двигателю с возвратно-поступательным движением поршней современные роторные двигатели для легковых автомобилей имеют регулируемую систему впуска, позволяющую влиять на характеристику крутящего момента двигателя. Каждый впускной канал имеет собственный порт на впускном трубопроводе. Это позволяет подключать один, два или три впускных канала, в зависимости от потребностей двигателя.

Зажигание

Поскольку камеры сгорания роторных двигателей имеют вытянутую форму, что неблагоприятно для зажигания, на современных роторных двигателях устанавливаются две независимые свечи зажигания, со сдвигом момента зажигания во времени. При этом запаздывающая свеча находится впереди опережающей свечи в направлении вращения.

Впрыск топлива

Топливо подается в двигатель через топливные форсунки с несколькими отверстиями, установленными в системе впуска, что обеспечивает достаточное распыление топлива. В двигателе Renesis (Mazda), каждый ротор имеет три топливные форсунки с различным

количеством отверстий. Каждая форсунка «обслуживает» один из трех каналов впуска.

Система охлаждения двигателя

Роторный двигатель обычно имеет жидкостную систему охлаждения. Расположение каналов охлаждения в корпусе ротора адаптировано к неравномерной тепловой нагрузке, испытываемой рабочей камерой трохоидальной формы. На стороне впуска, испытывающей небольшую тепловую нагрузку, количество каналов охлаждения меньше, чем на стороне выпуска, тепловая нагрузка которой значительно выше. Такое расположение каналов охлаждения предотвращает повреждение и деформацию камеры и роторов.

Характеристики роторного двигателя

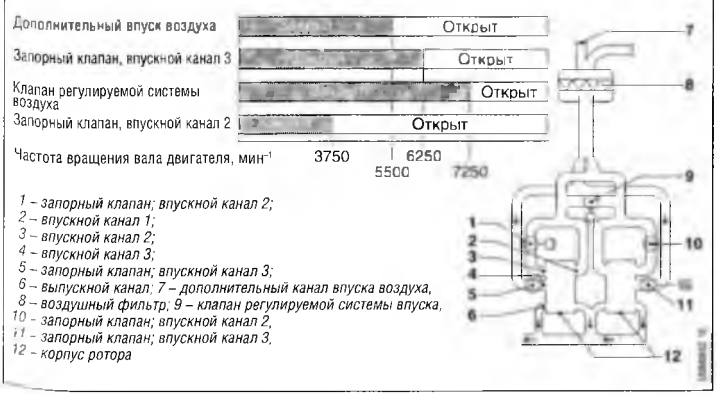
Преимущества: полная уравновешенность масс; благоприятная кривая изменения крутящего момента; компактная конструкция; меньшее количество компонентов (отсутствует клапанный механизм); легкость в управлении.

Недостатки: неблагоприятная форма камеры сгорания с длинными путями распространения пламени; повышенный расход топлива и масла; невозможность реализации дизельного цикла; высокое расположение выходного вала.

Из-за отсутствия возвратно-поступательно движущихся масс и ограничений на проход газа, скорость перемещения газового потока и частоту вращения вала двигателя можно значительно повысить.

Роторные двигатели могут быть полностью уравновешены. Единственным нерешенным вопросом является неравномерный крутящий момент, что характерно для всех ДВС. Улучшение постоянства потока мощности и других рабочих характеристик может быть достигнуто объединением нескольких роторов на одном валу. Кривую момента можно приблизить к характеристике дросселированного двигателя или двигателя гоночного автомобиля, изменяя момент впуска и сечение впускных каналов.

Рис. 3. Впускные и выпускные каналы с различными настройками регулируемой системы впуска:



Система охлаждения двигателя

Воздушное охлаждение

Воздухонагнетательное устройство и/или вентилятор направляют воздух вокруг оребренных стенок блока цилиндров и головки блока цилиндров. Для регулирования объемного расхода воздуха в системе могут быть предусмотрены устройства ограничения воздушного потока и регулирования скорости вращения вентилятора. Потребляемая системой мощность составляет 3–4 % общей мощности двигателя.

Моторное масло также обеспечивает охлаждение двигателя, для чего могут использоваться воздухоохлаждаемые масляные радиаторы.

По сравнению с жидкостными системами охлаждения недостатками систем воздушного охлаждения являются высокий уровень шума и недостаточная стабильность температуры двигателя. В настоящее время системы воздушного охлаждения применяются в основном на мотоциклах и в специальных случаях.

Жидкостное охлаждение

Система жидкостного охлаждения общепринята для легковых и грузовых автомобилей.

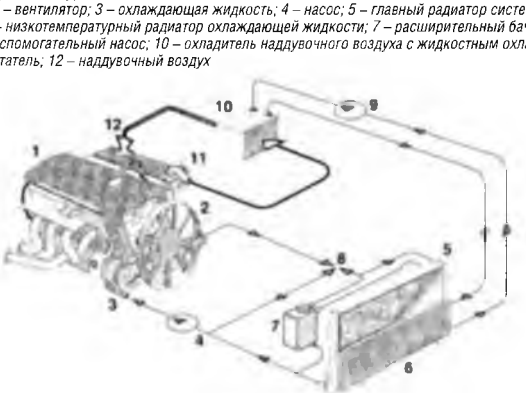
Вместо чистой воды, в настоящее время в качестве охлаждающей жидкости используется смесь воды (питьевого качества), антифриза (обычно этиленгликоля) и различных ингибиторов коррозии, выбор которых зависит от применения. При концентрации антифриза в охлаждающей жидкости порядка 30–50 % возрастает точка кипения этой смеси, что позволяет использовать ее при температурах до 120 °С и давлении до 1,4 бар.

Конструкции радиаторов и используемые материалы

Трубки радиаторов систем охлаждения современных легковых автомобилей изготавливаются исключительно из алюминия. Алюминиевые радиаторы все шире применяются и на коммерческих и грузовых автомобилях. Имеются два основных варианта конструкции: паяные радиаторы и радиаторы с механическими соединениями или сборные радиаторы.

Для охлаждения мощных двигателей или при ограниченном пространстве для размещения радиатора используются паяные радиаторы с плоскими трубками и гофрированными

Рис. 1. Система охлаждения двигателя легкового автомобиля
Система охлаждения двигателя и непрямого промежуточного охлаждения с отдельным низкотемпературным контуром:
1 – двигатель; 2 – вентилятор; 3 – охлаждающая жидкость; 4 – насос; 5 – главный радиатор системы охлаждения; 6 – низкотемпературный радиатор охлаждающей жидкости; 7 – расширительный бачок; 8 – термостат, 9 – вспомогательный насос; 10 – охладитель наддувочного воздуха с жидкостным охлаждением; 11 – турбонагнетатель; 12 – наддувочный воздух



охлаждающими пластинами. Они обладают минимальным аэродинамическим сопротивлением проходящему сквозь них воздуху.
Более дешевые, собранные механическим путем ребристо-трубчатые радиаторы применяются на менее мощных двигателях.

При сборке такого радиатора охлаждающая решетка формируется посредством крепления штампованных ребер вокруг круглых, овальных или плоских трубок. Рифленые или разрезные ребра располагаются перпендикулярно к направлению воздушного потока.

В целях улучшения теплопередачи охлаждающие ребра на стороне охлаждающего воздуха делаются рифлеными. Дополнительные меры повышения эффективности охлаждения включают применение трубок с минимальным диаметром и толщиной стенок и турбулизаторов на стороне охлаждающей жидкости при условии, что сопутствующие потери давления остаются в приемлемых пределах.

Бачки радиатора обеспечивают равномерное распределение охлаждающей жидкости в блоке цилиндров. Бачки радиатора изготавливаются из полиамида, усиленного стекловолокном. При этом все соединения и сборочные элементы выполнены как единое целое. Они крепятся к радиатору при помощи фланцев с уплотнениями из эластомерных материалов.

Новые разработки включают полностью алюминиевые радиаторы с бачками, изготавливаемыми также из алюминия и припаиваемыми к радиатору за одну операцию.

Конструкция радиатора

Независимо от режимов эксплуатации и окружающих условий, радиатор должен обеспечивать непрерывный и надежный отвод тепла от двигателя. Размеры и, следовательно, охлаждающую способность радиатора можно определить расчетным путем, используя соотношения, полученные по результатам испытаний, относящихся к теплопередаче и перепаду давлений.

Решающим фактором является масса воздуха, проходящего через радиатор, которая зависит от скорости движения автомобиля, сопротивления потоку в моторном отсеке и производительности вентилятора.

Основным назначением радиатора является поддержание температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя ниже максимально допустимого для данных рабочих условий уровня. При низких массовых расходах воздуха для достижения этой цели требуются большие радиаторы с низким сопротивлением потоку, в то время как при высоких массовых расходах воздуха возможно использование радиаторов меньшего размера с более высоким сопротивлением потоку. Однако в последнем случае, когда воздушный поток создается мощным вентилятором, имеет место высокое энергопотребление.

Задача нахождения наиболее подходящего решения в отношении технической осуществимости и экономичности может быть лучше всего оптимизирована при помощи моделирования. Наиболее подходящие и эффективные инструменты моделирования описывают все компоненты, оказывающие влияние на массовый расход воздуха. Результаты моделирования проверяются в ходе испытаний автомобиля в аэродинамических трубах.

Регулирование температуры охлаждающей жидкости

Двигатель автомобиля работает в очень широком диапазоне климатических условий и при больших колебаниях нагрузок. Температура охлаждающей жидкости, а, следовательно, и самого двигателя, должна регулироваться так, чтобы она оставалась постоянной внутри очень узкого диапазона своих значений.

Термостат с термочувствительным расширяющимся элементом

Термостат с термочувствительным расширяющимся элементом является надежным и безопасным устройством, идеально подходящим для системы охлаждения. Расширяющийся элемент термостата действует в качестве дисковой заслонки двойного действия, которая до достижения рабочей температуры перекрывает соединение контура охлаждения с радиатором, одновременно направляя поток охлаждающей жидкости, выходящий из двигателя, по перепускному каналу. При этом в двигатель возвращается неохлажденная жидкость («вторичный контур»).

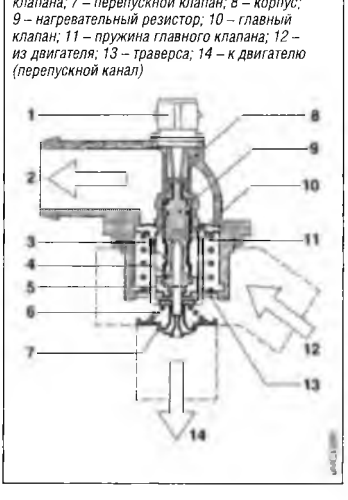
В пределах рабочего диапазона клапана термостата обе его стороны частично открыты. Это позволяет подавать в двигатель смесь охлажденной и неохлажденной охлаждающей жидкости для поддержания постоянной рабочей температуры двигателя. При дальнейшем повышении температуры термостат полностью открывается, и вся охлаждающая жидкость проходит через радиатор («первичный контур»).

Термостат с электронной системой управления

Дополнительные возможности предоставляет термостат с электронной системой управления (см. рис. 2). Этот термостат отличается от обычного термостата с расширяющимся элементом возможностью регулирования температуры открытия. Термостат с электронной системой управления содержит нагревательный резистор, служащий для дополнительного нагрева расширяющегося элемента с целью увеличения степени открытия клапана термостата со стороны радиатора и снижения температуры охлаждающей жидкости. Электрический ток, протекающий через нагревательный резистор, регулируется системой управления двигателем в целях поддержания оптимальной для данных рабочих условий температуры двигателя. Необходимые данные хранятся в виде программных карт в памяти системы управления двигателем.

Повышение рабочей температуры в диапазоне частичных нагрузок и ее снижение при высоких нагрузках дает следующие преимущества:

Рис. 2. Программируемый термостат:
1 – разъем; 2 – соединение с радиатором; 3 – корпус рабочего элемента; 4 – эластомерная вставка; 5 – поршень; 6 – пружина перепускного клапана; 7 – перепускной клапан; 8 – корпус; 9 – нагревательный резистор; 10 – главный клапан; 11 – пружина главного клапана; 12 – из двигателя; 13 – траверса; 14 – к двигателю (перепускной канал)



– снижение расхода топлива;
– снижение содержания вредных выбросов в отработавших газах;
– уменьшение износа;
– повышение теплового к.п.д. двигателя.

Расширительный бачок

Расширительный бачок предназначен для выпуска в атмосферу паров при давлении, выше которого наступает кавитация в зоне всасывания жидкостного насоса. Объем расширительного бачка должен быть достаточным, чтобы он мог вместить дополнительный объем охлаждающей жидкости, образующийся вследствие ее теплового расширения при быстром возрастании давления, и предотвратить закипание жидкости после остановки горячего двигателя.

Расширительный бачок изготавливается из пластмассы (обычно – полипропилена), хотя могут быть использованы более простые конструкции. Обычно расширительный бачок соединяется с системой охлаждения при помощи шлангов. Для обеспечения эффективного вытеснения воздуха расширительный бачок устанавливается в наивысшей точке системы охлаждения. В некоторых случаях расширительный бачок может составлять единое целое с бачком радиатора, или расширительный бачок и бачок радиатора могут соединяться при помощи фланцевого или разъемного соединителя.

Рис. 3. Электронное регулирование температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя



Место расположения и форму заливного отверстия выбирают так, чтобы исключалось переполнение бачка. Для контроля уровня охлаждающей жидкости может быть установлен электронный датчик уровня. Уровень охлаждающей жидкости также можно контролировать, если расширительный бачок изготовлен полностью или частично из прозрачной пластмассы, пользуясь нанесенными на него метками. Однако следует иметь в виду, что прозрачный полипропилен чувствителен к ультрафиолетовому излучению. По этой причине прозрачная часть расширительного бачка не должна подвергаться воздействию прямого солнечного света.

Вентиляторы

Конструкция

Вентиляторы используются для принудительного обдува радиаторов на малых скоростях движения. На легковых автомобилях в основном используют цельные (литые под давлением) пластиковые крыльчатки вентиляторов, на грузовых автомобилях также используются вентиляторы, изготавливаемые методом литья под давлением, способные передавать мощность до 30 кВт.

Вентиляторы, рассчитанные на передачу умеренных мощностей (до 850 Вт) в большинстве случаев снабжаются электродвигателями постоянного или переменного тока. Несмотря на то, что конструкция крыльчатки может обеспечивать относительно тихую работу, при высоких скоростях вращения эти вентиляторы имеют высокий уровень шума.

На некоторых легковых автомобилях, в частности, автомобилях с двигателями очень большой мощности и предназначенных для эксплуатации в условиях жаркого климата или на автомобилях с дизельными двигателями и кондиционерами воздуха, мощности электропривода оказывается недостаточно для обеспечения необходимого для охлаждения расхода воздуха. В таких случаях вентилятор приводится во вращение непосредственно от двигателя автомобиля через ременную передачу. Однако это возможно только при продольном расположении двигателя. Как правило, на коммерческих и тяжелых грузовых автомобилях вентиляторы приводятся во вращение при помощи ременной передачи. В некоторых редких случаях вентилятор крепится непосредственно на коленчатом вале.

Управление вентилятором

Система управления вентилятором требует особого внимания. В зависимости от типа автомобиля и условий его работы, воздушный поток (без применения вентилятора) может обеспечивать достаточное охлаждение вплоть до 95 % времени работы двигателя, поэтому, в целях экономии топлива, вентилятор должен быть снабжен системой управления. По этой причине электрические вентиляторы снабжаются ступенчатой или непрерывной системой управления, обеспечивающей продолжительность включения и скорость вращения вентилятора в соответствии с требуемой производительностью. Ступенчатая система управления может содержать реле и последовательно подключаемые к двигателю резисторы, в то время как непрерывная система требует применения силовых электронных компонентов. Входные сигналы на привод в этом случае подаются от электрических термостатических устройств или из блока управления двигателем.

Привод

Свою надежность и эффективность как на легковых, так и на коммерческих автомобилях доказали муфты жидкостного трения (вязкостные муфты). Такая муфта состоит из трех основных компонентов (см. рис. 4):

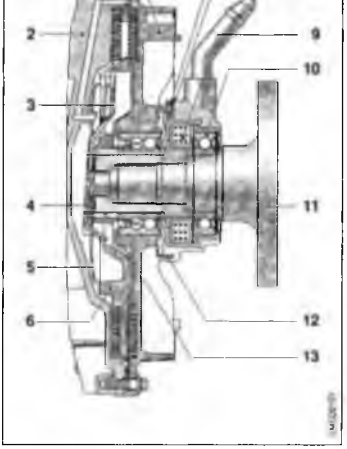
- первичный ведомый диск;
- вторичная ведомая секция, включающая основной корпус и крышку;
- управляющий механизм.

Промежуточный диск делит ведомую часть на питательную и рабочую камеры, через которые циркулирует рабочая жидкость. Первичный диск свободно вращается в рабочей камере. Крутящий момент передается за счет внутреннего трения высоковязкой жидкости. Между входной и выходной частями муфты имеет место определенная степень проскальзывания.

Вязкая жидкость представляет собой силиконовое масло. Мощность, передаваемая муфтой, а следовательно, и скорость вращения вентилятора определяется количеством силиконового масла в рабочей камере. Количество силиконового масла в рабочей камере регулируется при помощи клапана, установленного между питательной и рабочей камерами.

Применяются вязкостные муфты двух видов. Первым из них является зависимая от температуры саморегулирующаяся муфта, скорость вращения которой регулируется от нуля до максимального значения при помощи биметаллического элемента, управляющего стержня и рычага клапана. Контролируемыми переменными в этом случае являются температура воздуха на выходе радиатора и связанная с ней температура самой охлаждающей жидкости. Второй конструкцией является муфта с электронной системой управления и электромагнитным исполнительным устройством. В этом случае вместо одной контролируемой переменной используются несколько параметров, к которым обычно относятся значения предельных температур для различных охлаждающих жидкостей.

Рис. 4. Вязкостная муфта с электронной системой управления:
1 – корпус; 2 – крышка;
3 – нажимная пружина клапана;
4 – якорь электромагнита;
5 – промежуточный диск; 6 – ведущий диск,
7 – датчик Холла; 8 – постоянный магнит;
9 – катушка индуктивности, 10 – подшипник;
11 – вал с фланцем;
12 – кольцо датчика скорости;
13 – кольцо регулирования магнитного потока



Промежуточное охлаждение (охлаждение с наддувом воздуха)

Тенденции в разработке автомобильных двигателей демонстрируют постоянное увеличение удельной мощности. Эта тенденция идет рука об руку с переходом от безнаддувных двигателей к двигателям с турбонаддувом и далее к двигателям с турбонаддувом и промежуточным охлаждением. Необходимость в промежуточном охлаждении (охлаждении воздуха наддува) вызвана увеличением плотности воздуха на выходе турбонагнеталя и, следовательно, количества кислорода в воздухе для горения смеси. Промежуточное охлаждение также позволяет снизить содержание вредных выбросов в отработавших газах. При отсутствии промежуточного охлаждения (охлаждения воздуха наддува) на двигателе с турбонаддувом и искровым зажиганием необходимо было бы принимать соответствующие меры по предотвращению детонации, возникающей вследствие обогащения смеси или при позднем зажигании. Поэтому система промежуточного охлаждения косвенно способствует снижению расхода топлива и содержания вредных веществ в отработавших газах.

Конструктивные особенности

Для охлаждения наддувочного воздуха могут использоваться охлаждающая жидкость или окружающий воздух. За некоторым исключением, в настоящее время на легковых и коммерческих автомобилях применяются промежуточные охладители с воздушным охлаждением.

Промежуточный охладитель с воздушным охлаждением можно установить перед радиатором двигателя или после него, или в любом ином месте над модулем охлаждения. Он также может быть полностью отделен от радиатора и работать с использованием либо внешнего потока воздуха, либо создаваемого собственным вентилятором. Если промежуточный охладитель установлен перед радиатором, охлаждающий вентилятор обеспечивает достаточный воздушный поток даже при низких скоростях движения автомобиля. Однако такая компоновка имеет тот недостаток, что при этом нагревается сам охлаждающий воздух. Чтобы скомпенсировать этот эффект, необходимо соответственно увеличивать размеры радиатора.

Промежуточный охладитель с жидкостным охлаждением может быть установлен практически в любом месте моторного отсека,

поскольку технические трудности с обеспечением подачи в систему охлаждающей жидкости отсутствуют. Кроме того, благодаря своим скромным размерам, промежуточный охладитель этого типа требует значительно меньше пространства, чем промежуточный охладитель с воздушным охлаждением. Промежуточные охладители с жидкостным охлаждением отличаются высокой плотностью мощности. Однако, для эффективного охлаждения воздуха наддува температура охлаждающей жидкости должна быть очень низкой. Это требование имеет особенно большое значение в отношении коммерческих автомобилей и тяжелых грузовых автомобилей, поскольку в этом случае необходимо нагреть воздух наддува на 15 К выше температуры наружного воздуха. Следовательно, чтобы обеспечить требуемую температуру охлаждающей жидкости, может потребоваться установить в охлаждающем модуле низкотемпературный радиатор. Без такого радиатора воздух наддува может быть охлажден только до уровня, близкого к температуре охлаждающей жидкости двигателя.

Промежуточный охладитель изготавливается из гофрированных алюминиевых пластин и трубок, которые аналогичны тем, что используются в радиаторе основной системы охлаждения. Широкие трубки с охлаждающими пластинами позволяют получить благоприятные характеристики и конструктивную целостность охладителя. Плотность ребер на стороне охлаждающего воздуха относительно невелика и приблизительно соответствует плотности внутренних ребер для достижения хорошего распределения сопротивления теплопередаче.

Особенно важным параметром промежуточного охладителя является коэффициент рассеяния теплоты Φ. Этот параметр определяет зависимость между эффективностью охлаждения наддувочного воздуха и разностью между температурами наддувочного и охлаждающего воздуха:

$$\Phi = (t_{1E} - t_{1A}) / (t_{1E} - t_{2E}),$$

где

Φ – коэффициент рассеяния теплоты;
t_{1E} – температура наддувочного воздуха на входе;
t_{1A} – температура наддувочного воздуха на выходе;
t_{2E} – температура охлаждающего воздуха на входе.

Для легковых автомобилей: $\Phi = 0,4 – 0,7$.
Для грузовых автомобилей: $\Phi = 0,9 – 0,95$.

По возможности, напорная воздушная камера изготавливается методом литья под давлением из армированного волокном полиамида, как цельная отливка со всеми соединениями и креплениями. Напорные камеры, подвергающиеся повышенным напряжениям на стороне впуска наддувочного воздуха, изготавливаются методом литья под давлением из термостойкого полифталамида или полифениленсульфида. Они крепятся к радиатору при помощи фланцев и уплотняются при помощи уплотнений из эластомерных материалов. Напорные камеры с поднутрением, предназначенные для работы в условиях высоких температур, изготавливаются методом литья из алюминиевого сплава и привариваются к радиатору.

Охлаждение масла и топлива

Часть теплоты, выделяемой двигателем, поглощается маслом, для охлаждения которого часто используется поверхность масляного поддона. Если температура масла выходит за пределы установленного диапазона при работе двигателя на режиме полной нагрузки (мощные автомобили), то необходима дополнительная установка масляного радиатора.

Маслоохладители могут быть охлаждаемыми воздухом или жидкостью. Они могут быть установлены в охлаждающем модуле или любом ином месте в моторном отсеке. Если маслоохладитель установлен вне охлаждающего модуля, без принудительного обдува, необходимо принять меры к обеспечению надлежащей подачи охлаждающего воздуха.

Маслоохладители, охлаждаемые воздухом

Маслоохладители, охлаждаемые воздухом, в основном изготавливаются из алюминия. В большинстве случаев они состоят из плоских трубок и рифленых ребер и отличаются высокой плотностью энергии. В меньшей степени распространены сборные системы с механическим креплением круглых трубок и ребер. В целях увеличения охлаждающей способности и прочности (стойкости к высоким внутренним давлениям) в систему плоских трубок впаяны специальные вставки для создания турбулентности.

На мощных коммерческих и легковых автомобилях также устанавливаются охлаждаемые воздухом маслоохладители трансмиссии. Для обеспечения хорошего теплообмена они устанавливаются перед основным радиатором двигателя.

Маслоохладители с жидкостным охлаждением

В настоящее время составные алюминиевые маслоохладители с жидкостным охлаждением практически вытеснили дисковые охладители из нержавеющей стали и алюминиевые охладители с разветвленными трубками.

Дисковые маслоохладители устанавливаются между блоком цилиндров и масляным фильтром. Они имеют отдельный кожух и центральный канал для прохождения масла. Масло, возвращающееся из масляного фильтра, проходит через лабиринт перфорированных дисков, разделенных специальными вставками для создания турбулентности. Этот лабиринт охлаждается охлаждающей жидкостью, протекающей через кожух.

Охладители с разветвленными трубками состоят из оребренных трубок, по которым протекает охлаждающая жидкость. На стороне подачи масла они не имеют кожуха, поэтому должны быть встроены в корпус масляного фильтра или масляный поддон.

Составные дисковые маслоохладители состоят из отдельных дисков с установленными между ними вставками для создания турбулентности. Края дисков вставлены в кожух. Каналы, образованные дисками, соединены таким образом, что охлаждающая жидкость и масло протекают по различным каналам.

Когда потребность в охлаждении более умеренна (для рабочих жидкостей в автоматических трансмиссиях), могут использоваться маслоохладители для легковых и коммерческих автомобилей. Они не имеют кожуха на стороне охлаждающей жидкости и встраиваются в выпускной бачок радиатора охлаждающей жидкости. Для этой цели могут использоваться маслоохладители со сдвоенными трубками (частично изготавливаемыми из цветных металлов) или с плоскими алюминиевыми трубками. Маслоохладители со сдвоенными трубками состоят из двух концентричных трубок с установленными между ними вставками для создания турбулентности. Маслоохладители с плоскими трубками представляют собой систему плоских трубок и вставок для создания турбулентности на стороне охлаждающей жидкости. Соединения выполняются методом высокотемпературной пайки. Плоские трубки соединены друг с другом через отверстия на их концах. В целях повышения охлаждающей способности и прочности в плоские трубки впаяны вставки для создания турбулентности.

Для охлаждения моторного масла двигателей коммерческих автомобилей обычно используются дисковые охладители из нержавеющей стали или охладители с плоскими алюминиевыми трубками без кожуха на стороне охлаждающей жидкости. Они встраиваются в удлиненный канал охлаждающей жидкости в блоке цилиндров.

Охладитель топлива

Охладители топлива устанавливаются на современных дизельных двигателях для охлаждения избытка топлива до допустимого уровня. Это избыточное дизельное топливо нагревается во время впрыска в результате сжатия в топливном насосе высокого давления перед его возвратом в топливный бак по обратной линии. Охлаждение топлива может осуществляться при помощи системы с воздушным или жидкостным охлаждением. Поэтому для этой цели используются охладители с воздушным охлаждением или дисковые охладители различных типов.

Технология модульного охлаждения

Охлаждающие модули представляют собой конструктивные элементы, состоящие из различных компонентов охлаждения и кондиционирования воздуха, используемых на легковых автомобилях, и содержащие вентилятор с приводом (например, гидростатическим двигателем, электродвигателем или вязкостной муфтой).

Технология модульного охлаждения охватывает конструкцию компонентов с учетом их взаимодействий, доступного пространства и связей с другими системами. Проблемы в отношении сопряжений включают:

- методы установки;
- воздуховоды;
- уплотнения на стороне охлаждающего воздуха;
- подсоединение к компонентам линий подачи масла и охлаждающей жидкости;
- разъемные электрические соединения.

К преимуществам модульной техники относятся:

- упрощение логики управления за счет объединения компонентов в единый конструктивный блок;
- уменьшение количества соединений;
- простота установки и сборки;
- оптимальная конструкция компонентов;
- модульные системы, подходящие для различных двигателей и вариантов оборудования;
- повышение общего уровня качества сборки.

Для оптимизации конструкции компонентов модулей охлаждения используются различные методы моделирования и испытаний. Исходя из известных характеристик вентиляторов, приводов и теплообменников, разрабатываются моделирующие программы, воспроизводящие условия как на стороне охлаждающего воздуха, так и на стороне охлаждаемого масла. Включая в модели отдельные компоненты, можно исследовать взаимодействия компонентов при различных условиях работы. Все более широкое применение находят инструменты системы компьютеризованного конструирования (CAD). При этом в систему CAD вводятся все геометрические данные, которые затем обрабатываются системой соответствующим образом. Для исследования потоков охлаждающего воздуха в моторном отсеке используются методы вычислительной гидроаэродинамики (CFD), для анализа прочности конструкции и устойчивости системы - анализ методом конечных элементов (FEM). Завершает этот процесс стадия испытаний на моделях или прототипах, которые могут проводиться в аэродинамических трубах или на вибростендах.

Технология систем охлаждения

В то время как охлаждающий модуль включает компоненты, выполняющие определенные функции, система охлаждения охватывает все компоненты, относящиеся к охлаждению, в том числе и те, которые не входят в состав законченных конструктивных узлов. Сюда относятся компоненты, не входящие в состав модуля охлаждения, такие как соединительные трубопроводы и шланги, насосы, расширительные бачки и элементы управления.

Технология систем охлаждения имеет целый ряд технических и экономических преимуществ:

- снижение паразитных потерь за счет оптимизации гидравлической части системы;
- оптимизация процессов управления и динамики;
- оптимизация системы отопления салона автомобиля;
- большое количество вариантов, что позволяет выбрать наиболее подходящий для данного автомобиля и условий эксплуатации;
- стандартизованная концепция сборки всех компонентов системы охлаждения;
- снижение затрат на разработку благодаря уменьшению количества интерфейсов.

Интеллектуальные системы теплового регулирования

В настоящее время имеют место тенденции к разработке оптимизированных систем регулирования различных потоков веществ и тепловых потоков.

Тепловое регулирование выходит далеко за пределы систем охлаждения в том отношении, что оно учитывает все потоки веществ и тепловые потоки, имеющие место в автомобиле, т.е. в дополнение к системе охлаждения двигателя учитывается, например, система кондиционирования воздуха. Цели оптимизации включают:

- снижение расхода топлива и содержания вредных веществ в отработавших газах;
- повышение эффективности кондиционирования воздуха;
- увеличение срока службы компонентов;
- улучшение охлаждения при частичных нагрузках двигателя.

Один из основных принципов теплового регулирования заключается в том, что вспомогательная мощность, используемая для работы системы охлаждения, всегда представляет собой потери полезной мощности двигателя, и производительность тех или иных компонентов не может произвольно повышаться при неизменной доступной вспомогательной мощности. Поэтому для достижения целей оптимизации система охлаждения снабжается «интеллектуальной» микропроцессорной системой управления как с известными, так и с новыми исполнительными механизмами. Например, в целях снижения интенсивности подачи охлаждающего воздуха до необходимого минимума в зависимости от рабочих условий (регулирование по потребности) система может быть оборудо-

вана регулируемыми шторками радиатора или регулируемым приводом вентилятора. В дополнение к снижению коэффициента сопротивления c_d), эти меры способствуют ускорению прогрева двигателя при низких наружных температурах и повышению эффективности системы отопления салона. Уменьшение части мощности, расходуемой на работу системы охлаждения, означает наличие запаса мощности, который может быть использован при критических состояниях системы охлаждения, с обеспечением в то же время выполнения целей оптимизации.

Другим важным принципом является поддержание, насколько возможно, постоянной температуры охлаждаемых компонентов независимо от условий работы и окружающих условий. Примером применения этого принципа является использование охлаждающей жидкости двигателя для регулирования температуры рабочей жидкости трансмиссии. Быстрый прогрев рабочей жидкости после запуска двигателя и ее эффективное охлаждение, предотвращающее перегрев, снижают потери на трение в трансмиссии, увеличивают срок службы и позволяют увеличить интервалы технического обслуживания.

В конечном итоге, рассмотрение систем охлаждения и кондиционирования воздуха как единого целого открывает новые возможности использования «тепловой интеграции». Тепловые потоки одной системы могут использоваться или рассеиваться другой системой без необходимости в каком-либо значительном увеличении вспомогательной мощности. Примером такого подхода является использование отходящего тепла системы охлаждения отработавших газов для отопления салона автомобиля.

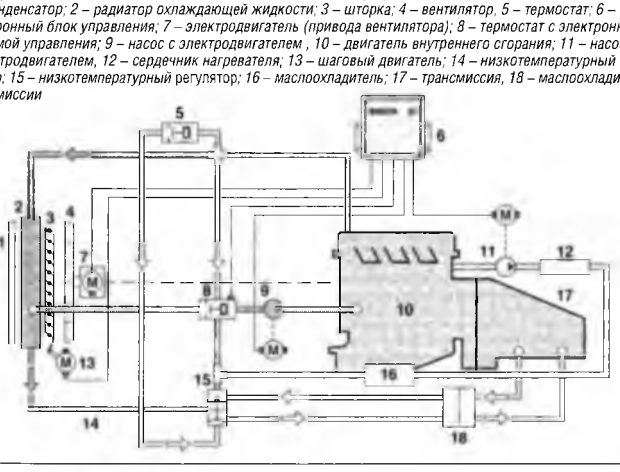
В целом система теплового регулирования включает:

- выравнивание температуры рабочей жидкости трансмиссии;
- программируемый термостат;
- электрически регулируемую вязкостную муфту;
- регулирование скорости насоса системы охлаждения;
- регулирование потока охлаждающего воздуха при помощи, например, шторок радиатора;
- охлаждение отработавших газов;
- жидкостное охлаждение воздуха наддува (промежуточное охлаждение).

Потенциал снижения расхода топлива за счет применения всех этих устройств и систем составляет до 5 % (для легковых автомобилей). Кроме того, имеется ряд дополнительных пре-

Рис. 5. Управляемая система охлаждения

Пример компоновки с теплообменниками и исполнительными устройствами:
1 – конденсатор; 2 – радиатор охлаждающей жидкости; 3 – шторка; 4 – вентилятор, 5 – термостат; 6 – электронный блок управления; 7 – электродвигатель (привода вентилятора); 8 – термостат с электронной системой управления; 9 – насос с электродвигателем , 10 – двигатель внутреннего сгорания; 11 – насос с электродвигателем, 12 – сердечник нагревателя; 13 – шаговый двигатель; 14 – низкотемпературный контур; 15 – низкотемпературный регулятор; 16 – маслоохладитель; 17 – трансмиссия, 18 – маслоохладитель трансмиссии



имуществ, соответствующих вышеуказанным целям оптимизации. Решающее значение в реализации этого потенциала имеют пределы, в которых система управления двигателем использует опции управления системой охлаждения.

В настоящее время на автомобилях в различной степени реализуются те или иные отдельные меры по оптимизации температурных режимов узлов автомобиля. В то же время комплексная система теплового регулирования остается резервом для будущих поколений автомобилей.

Охлаждение отработавших газов

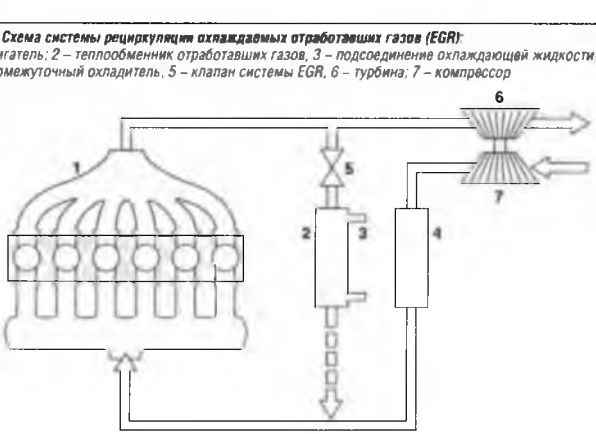
В связи с принятием новых более жестких норм предельно допустимого содержания вредных веществ в отработавших газах дизельных двигателей, объектом внимания специалистов становятся новые технологии по снижению токсичности. Одной из таких технологий является охлаждаемая система рециркуляции отработавших газов (EGR). Система рециркуляции отработавших газов размещается в области высокого давления двигателя. Часть отработавших газов отбирается из основного потока между блоком цилиндров и турбонагнетателем отработавших газов. Эти отработавшие газы охлаждаются охлаждающей жидкостью двигателя, а затем снова вводятся в поток свежего воздуха на выходе промежуточного охладителя. Система EGR состоит из клапана, регулирующего количество рециркулирующих отработавших газов, выпускных трубопроводов и теплообменника, который подвергается воздействию очень высоких температурных нагрузок (например, в двигателях легковых автомобилей температура отработавших газов может достигать 450 °С, а в двигателях грузовиков – 700 °С), что требует применения термостойких материалов.

Кроме того, материал должен обладать стойкостью к коррозии и иметь высокую механическую прочность. Поэтому для этих целей применяются специальные нержавеющие стали.

Для достижения необходимой степени рециркуляции теплообменники должны обеспечивать очень низкий перепад давления. Также должны быть приняты меры к предотвращению их засорения. В конструкции охладителей отработавших газов применены пучки гладких или оребренных труб. Отработавшие газы проходят по трубкам, а охлаждающая жидкость циркулирует в рубашке охладителя.

Еще одним применением охладителей отработавших газов является их предварительное охлаждение на двигателях с искровым зажиганием. Предварительное охлаждение отработавших газов требуется для поддержания их температуры в пределах рабочего диапазона каталитических нейтрализаторов аккумуляторного типа.

Рис. 6. Схема системы рециркуляции охлаждаемых отработавших газов (EGR):
1 – двигатель; 2 – теплообменник отработавших газов, 3 – подсоединение охлаждающей жидкости 4 – промежуточный охладитель, 5 – клапан системы EGR, 6 – турбина; 7 – компрессор



Система смазки двигателя

Система принудительной смазки двигателя

Система принудительной смазки в сочетании с разбрызгиванием масла и смазкой масляным туманом является наиболее распространенной системой смазки автомобильных двигателей. Масляный насос (обычно шестеренчатого типа) подает масло под давлением во все подшипники двигателя, в то время как поверхности скольжения смазываются посредством разбрызгивания масла или масляным туманом.

После протекания масла через все подшипники и пары трения оно стекает и собирается в масляном поддоне. Здесь происходит охлаждение масла, гашение пены и осаждение загрязняющих примесей. Высоконагруженные двигатели снабжаются дополнительно маслоохладителем.

Срок службы двигателя в огромной степени зависит от чистоты масла.

Компоненты

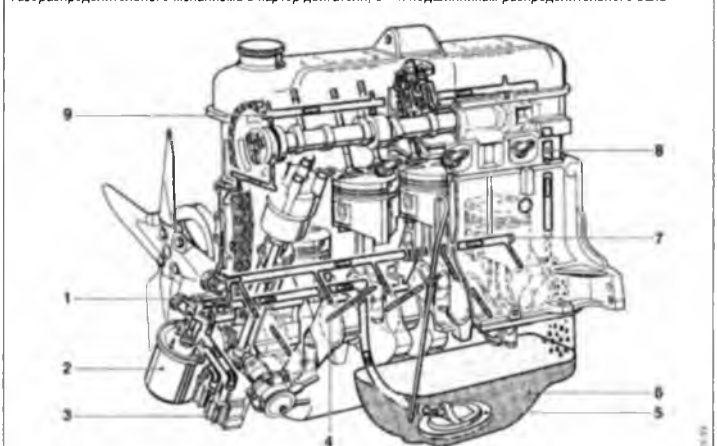
Масляные фильтры

Функции

Масляные фильтры служат для удаления из моторного масла загрязнений (остаточных продуктов горения топлива, частиц металла, пыли и т.д.), которые, в противном случае могут вызывать повреждение и износ компонентов двигателя. Поскольку моторное масло непрерывно циркулирует в системе смазки, ненадлежащая фильтрация масла может вызвать накопление в нем загрязнений, значительно ускоряющих износ компонентов. Следует иметь в виду, что масляный фильтр не задерживает жидкие или растворимые вещества, такие как вода, присадки или продукты разложения, образующиеся в процессе старения масла.

Что касается износа, он в значительной степени определяется количеством и размерами содержащихся в масле твердых частиц. Типичный размер твердых частиц составляет от

Рис. 1. Система принудительной смазки двигателя:
1 – предохранительный клапан; 2 – масляный фильтр; 3 – шестеренчатый насос; 4 – канал передачи масла из коренного подшипника в шатунный; 5 – впускной колоколообразный кожух с сетчатым фильтром; 6 – масляный поддон; 7 – подача масла в подшипники коленчатого вала, 8 – возврат масла из картера газораспределительного механизма в картер двигателя; 9 – к подшипникам распределительного вала



0,5 до 500 мкм. Поэтому тонкость фильтрации масляного фильтра выбирается в зависимости от требований для того или иного двигателя.

Типы и конструкции масляных фильтров

В принципе существуют два основных типа масляных фильтров: быстросменные фильтры и фильтры со сменными элементами. В быстросменных фильтрах фильтрующий элемент заключен в корпусе, который не может быть открыт. Такой фильтр наворачивается на резьбовую шпильку на блоке цилиндров. Быстросменный масляный фильтр заменяется целиком при каждой замене масла.

Фильтр со сменным элементом имеет корпус, постоянно закрепленный на блоке цилиндров, который может быть открыт для доступа к сменному фильтрующему элементу. Во время замены масла заменяется только фильтрующий элемент; корпус является постоянным компонентом. В последнее время используются фильтрующие элементы, не имеющие металлических частей. Это означает, что фильтрующий элемент может быть полностью утилизирован посредством сжигания.

Кроме фильтрующего элемента фильтры обоих типов обычно снабжаются перепускным клапаном, который открывается при повышении перепада давления на фильтре для обеспечения эффективной смазки компонентов двигателя. Типичное давление открытия этого клапана составляет от 0,8 до 2,5 бар. Увеличение перепада давления на фильтре может происходить при использовании масла с высокой вязкостью или в случае значительного загрязнения фильтрующего элемента.

В зависимости от конкретных требований фильтры обоих типов могут снабжаться обратным клапаном, устанавливаемым на входе или выходе фильтра. Эти клапаны предотвращают опорожнение фильтра после остановки двигателя.

В настоящее время интервалы замены моторного масла и масляного фильтра составляют от 15 000 до 50 000 км для легковых автомобилей и от 60 000 до 120 000 км для коммерческих автомобилей.

Фильтрующий материал

Для фильтрации масла применяются различные материалы. В основном они представляют собой волоконные материалы различной конфигурации. Чаще всего используется гофрированный материал, однако в некоторых случаях, особенно в перепускных фильтрах, применяется спирально намотанный материал или набивной волоконный материал. Основным материалом, используемым в фильтрах, является целлюлоза. Возможно добавление к целлюлозе пластмассового волокна или стекловолокна. Для повышения маслостойкости и стабильности материала он пропитывается

Рис. 2. Масляный фильтр со сменным элементом:
1 – туманоуловитель; 2 – регулирующий клапан; 3 – фильтрующий элемент; 4 – пластмассовая крышка; 5 – маслоохладитель с водяным охлаждением; 6 – корпус; 7 – перепускной клапан

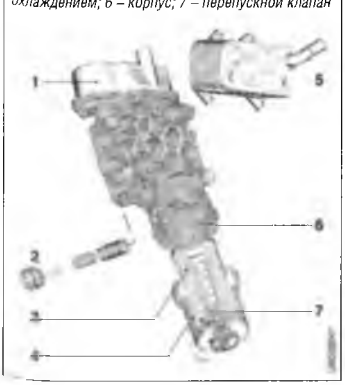
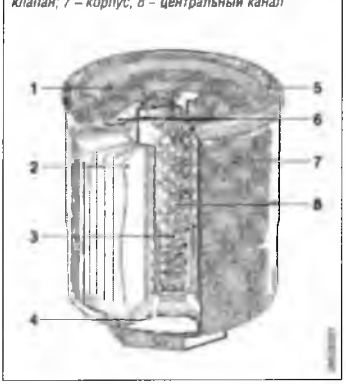


Рис. 3. Быстросменный масляный фильтр:
1 – резьбовая крышка, 2 – фильтрующий элемент; 3 – перепускной клапан; 4 – пружина; 5 – уплотнение, 6 – диафрагменный обратный клапан; 7 – корпус, 8 – центральный канал



смолой. В последнее время все более широко используются фильтрующие элементы из чисто синтетических волоконных материалов, поскольку они имеют более высокую химическую стойкость, что позволяет увеличить интервал их замены. Эти материалы также дают лучшие возможности структурирования трехмерной матрицы волокна в целях оптимизации процесса фильтрации и повышения эффективности задержания твердых частиц.

Полнопоточные фильтры

Все современные автомобили снабжаются полнопоточными масляными фильтрами. В соответствии с этим принципом фильтрации через фильтр проходит весь поток смазочного масла. Следовательно, все частицы, которые могут вызывать износ и повреждение компонентов двигателя, задерживаются фильтром при первом же прохождении через него.

Факторами, определяющими площадь фильтрации, являются объемный расход масла и способность фильтра к задержанию твердых частиц.

Перепускные фильтры

Перепускные фильтры (тонкой очистки или центробежного типа) служат для сверхтонкой очистки или микрофильтрации моторного масла. Эти фильтры способны очищать масло от значительно более мелких частиц, чем полнопоточные фильтры. Они могут удалять из масла мельчайшие абразивные частицы, что предотвращает быстрый износ компонентов двигателя. Для предотвращения увеличения вязкости масла также следует очищать его от частиц сажи. Максимально допустимая концентрация сажи составляет приблизительно 3–5 %. При более высоких концентрациях имеет место значительное увеличение вязкости масла, что вызывает снижение его функциональной эффективности.

По этой причине перепускные фильтры устанавливаются в основном на дизельных двигателях. Через перепускной фильтр проходит только часть потока масла, выходящего из двигателя (8–10 %).

Рис. 5. Тонкость фильтрации полнопоточных и перепускных фильтров (по стандарту ISO 4548-12):
------- *максимальная тонкость фильтрации перепускных и полнопоточных фильтров,*
——— *минимальная тонкость фильтрации перепускных и полнопоточных фильтров*

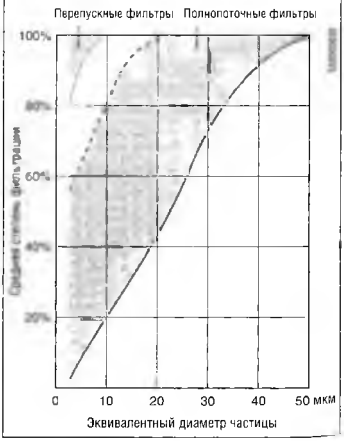
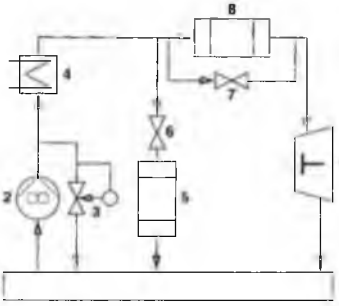


Рис. 4. Система смазки с полнопоточным и перепускным фильтрами (схема):
1 – масляный поддон;
2 – масляный насос,
3 – клапан регулирования давления;
4 – маслоохладитель;
5 – перепускной фильтр;
6 – дроссельный клапан;
7 – перепускной клапан;
8 – полнопоточный фильтр;
9 – двигатель



Фильтрация воздуха

Загрязняющие воздух примеси

Воздушные фильтры автомобильных двигателей, также называемые воздухоочистителями, служат для снижения содержания частиц и иных загрязняющих элементов в поступающем в двигатель воздухе. К типичным загрязнителям воздуха относятся масляный туман, аэрозоли, сажа, газообразные промышленные отходы, растительная пыльца и пыль. Размеры этих частиц могут варьироваться в очень больших пределах. Частицы пыли, всасываемые вместе с воздухом, могут иметь диаметр от 0,01 мкм (в основном, частицы сажи) до 2 мм (зерна песка). Приблизительно 75 % частиц (по весу) имеют размер от 5 до 100 мкм.

Массовое содержание загрязнений в воздухе зависит от условий эксплуатации автомобиля. Так, за десять лет эксплуатации количество пыли, скопившейся в автомобиле, может составить от нескольких грамм до нескольких килограмм.

Воздушные фильтры (воздухоочистители)

Функции

Воздушный фильтр предотвращает всасывание в двигатель пыли и частиц и загрязнение моторного масла. Это снижает износ подшипников, поршневых колец, стенок цилиндров и т.д.

Материалы и конструкция воздушных фильтров

Воздушные фильтры в основном представляют собой фильтры глубокого слоя, которые, в отличие от поверхностных фильтров, задерживают частицы в структуре фильтрующего материала. Фильтры глубокого слоя с высокой пылепоглощающей способностью используются всегда, когда требуется экономичная фильтрация больших объемов воздуха с низкой концентрацией частиц.

Воздушные фильтры, разработанные с применением последних достижений, обеспечивают степень фильтрации по массе до 99,8 % на легковых автомобилях и до 99,95 % на коммерческих автомобилях. Эти значения должны обеспечиваться при всех преобладающих условиях в воздухозаборной системе двигателя, в том числе в условиях пульсаций давления воздуха. Фильтры низкого качества пропускают большее количество частиц пыли или демонстрируют склонность к разрыву. Фильтрующие элементы разрабатываются в соответствии с требованиями, имеющими место для двигателей различных типов. Это обеспечивает минимальные потери давления и высокую эффективность фильтрации независимо от интенсивности воздушного потока. Фильтрующий материал в плоских или цилиндрических фильтрах – складчатый или гофрированный, что позволяет получить максимальную площадь поверхности в пределах доступного объема. Материал в основном состоит из целлюлозного волокна, подвергнутого специальному тиснению и пропитанного смолой для обеспечения достаточной механической прочности, водостойкости и химической стойкости.

Периодичность замены фильтрующих элементов указывается изготовителями автомобилей и может составлять от двух до четырех, а в некоторых случаях даже до шести лет или через каждые 40, 60 или 90 тысяч километров пробега, или при увеличении перепада давления на фильтре до 20 мбар.

Потребность в компактных, высокоэффективных воздушных фильтрах с длительным сроком службы вызвала необходимость в разработке инновационных фильтрующих материалов. Уже налажено серийное производство воздушных фильтров на основе синтетического волокна, отличающихся значительно более высокими рабочими характеристиками. На рис. 1 представлена фотография структуры синтетического фильтрующего материала (фетра) с непрерывно увеличивающейся плотностью и уменьшающимся диаметром

Рис. 1. Фотография структуры синтетического волоконного материала для фильтрующих элементов, полученная при помощи электронного сканирующего микроскопа



волокон в направлении от впускной стороны фильтра к выпускной.

Лучшие результаты, по сравнению с чисто целлюлозными материалами, могут быть достигнуты за счет использования композитных материалов (например, бумаги с оплавленным слоем) и специальных нановолоконных материалов. Эти материалы состоят из относительно грубой целлюлозной подложки, на которую нанесен волоконный материал со сверхтонкими волокнами диаметром от 30 до 40 нм.

Скоро ожидается выпуск на рынок новых сажевых фильтров для дизельных двигателей, в которых применены новые гофрированные или складчатые структуры материалов с попеременно перекрывающимися и открывающимися каналами.

В дополнение к стандартным конструкциям, в целях оптимального использования свободного пространства в моторном отсеке, которое становится все более ограниченным, разрабатываются воздушные фильтры конической, овальной, ступенчатой или трапецеидальной формы.

Глушители

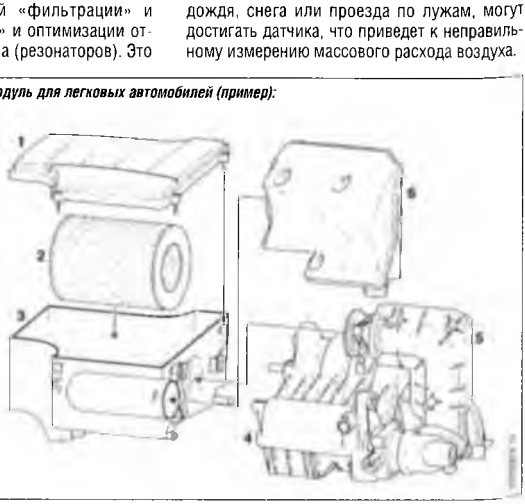
Раньше кожухи воздухоочистителей разрабатывались практически исключительно как глушители шума. В целях поглощения шума использовался большой объем этих кожухов. В настоящее время имеет место тенденция к разделению функций «фильтрации» и «снижения уровня шума» и оптимизации отдельных источников шума (резонаторов). Это позволяет уменьшить размеры корпуса фильтра и создать очень миниатюрные фильтры, которые можно встроить в панели обшивки двигателя, в то время как глушители устанавливаются в менее доступных местах моторного отсека.

Воздухоочистители для легковых автомобилей

В дополнение к кожуху с цилиндрическим фильтрующим элементом воздухозаборный модуль легкового автомобиля (см. рис. 2) включает всю систему воздуховодов и впускной трубопровод. Между ними располагаются резонаторы Гельмгольца и четвертьволновые трубки, служащие для оптимизации акустических характеристик системы (см. «Глушители системы выпуска отработавших газов»). Оптимизация всей системы позволит более эффективно согласовать отдельные компоненты в целях соблюдения все более строгих требований к ограничению уровня шума.

Следует отметить увеличение потребности в водоотделительных компонентах, встраиваемых в систему воздухозабора. Их основным назначением служит защита датчика массового расхода воздуха (HFM). Капли воды, всасываемые через неоптимально расположенные впускные фитинги, во время сильного дождя, снега или проезда по лужам, могут достигать датчика, что приведет к неправильному измерению массового расхода воздуха.

Рис. 2. Воздухозаборный модуль для легковых автомобилей (пример):
1 – крышка корпуса,
2 – фильтрующий элемент;
3 – корпус фильтра;
4 – впускной модуль,
5 – выпуск отфильтрованного воздуха,
6 – впуск нефильтрованного воздуха



Для отделения капель воды в линию воздухозабора встраиваются дефлекторы или фильтры циклонного типа. Чем меньше расстояние между точкой воздухозабора и фильтрующим элементом, тем ниже эффективность системы водоотделения, поскольку при такой компоновке имеют место очень низкие потери давления. Однако могут быть разработаны специальные конструкции фильтрующих элементов для сбора (коалесцирования) капель воды и отвода водяной пленки наружу до достижения собственно фильтрации твердых частиц. Вся система размещается в едином корпусе, специально предназначенном для совмещения этих функций. Эта компоновка может быть с успехом использована даже в случае очень коротких впускных воздуховодов.

Еще одним новым компонентом, который, вероятно, станет стандартным на воздухозаборных системах всех легковых автомобилей является «углеводородная ловушка», предназначенная для отделения (адсорбирования) углеводородов, которые могут диффундировать после остановки двигателя из впускного трубопровода (впуска двигателя) и системы вентиляции картера в направлении впуска нефильтрованного воздуха. Потребность в таком устройстве была вызвана чрезвычайно строгими требованиями законодательства штата Калифорния SULEV (Автомобили со сверхнизкими выбросами). В течение определенного периода времени такие автомобили могут выбрасывать в окружающую среду чрезвычайно малое количество углеводородов. Источник таких выбросов представляет собой открытая система впуска. Какой-либо конкретной схемы не принято. Встраивание углеводородной ловушки в корпус воздухоочистителя сразу же после сажевого фильтра столь же возможно, как ее установка в линии фильтрованного или чистого воздуха перед датчиком массового расхода воздуха или после него. Система включает компоненты, имеющие покрытие из активированного угля, и при относительно большой площади поверхности создающие очень малые потери давления. В соответствии с требованиями действующего законодательства, эти углеводородные ловушки должны постоянно обдуваться воздушным потоком, т.е. не должны быть активны, когда двигатель не работает. Как только двигатель начинает работать, воздушный поток вызывает десорбцию углеводородов, что, в свою очередь, вызывает регенерацию или реактивацию сепаратора.



Рис. 3. Бумажный воздушный фильтр для коммерческих автомобилей (пример):
1 – впуск воздуха; 2 – выпуск воздуха 3 – фильтрующий элемент, 4 – опорная труба, 5 – корпус; 6 – пылесборник

Воздухоочистители для грузовых автомобилей

На рис. 3 показан легкообслуживаемый и оптимизированный по весу пластмассовый воздушный фильтр для коммерческих автомобилей. Его фильтрующие элементы отличаются очень высокой степенью фильтрации и рассчитаны на интервалы замены свыше 100 000 км пробега, что значительно превышает интервалы замены, предусмотренные для фильтров легковых автомобилей.

Для эксплуатации в условиях очень высокой запыленности воздуха и на строительных и сельскохозяйственных машинах перед основным воздухоочистителем устанавливается предварительный фильтр. Предварительный фильтр задерживает крупные, тяжелые частицы, что значительно увеличивает срок службы фильтра тонкой очистки. В своей простейшей форме этот сепаратор представляет собой кольцо из дефлекторных пластин или лопастей, вызывающих круговорот воздушного потока. Под действием возникающих при этом центробежных сил происходит отделение крупных частиц. Однако, потенциал центробежных сепараторов для коммерческих автомобилей может быть реализован надлежащим образом только при помощи батарей миниатюрных циклонных предварительных фильтров, оптимизированных для работы совместно с основным фильтром.

Турбокомпрессоры и нагнетатели

Турбокомпрессоры и нагнетатели предназначены для увеличения массового расхода воздуха при данных рабочем объеме и частоте вращения коленчатого вала, и тем самым, повышения плотности мощности. Эти «компрессоры» в целом подразделяются на три следующих типа: нагнетатели с механическим приводом, турбокомпрессоры, приводимые в действие отработавшими газами, и нагнетатели, использующие волну сжатия газов.

В случае нагнетателя с механическим приводом мощность, необходимая для его привода, отбирается непосредственно от коленчатого вала через ременную или зубчатую передачу, т.е. нагнетатель и двигатель механически соединены.

В случае турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами, мощность требуемая для привода, генерируется за счет расширения отработавших газов, т.е. использования части энергии отработавших газов Турбокомпрессор и двигатель соединены друг с другом чисто термодинамически. В этом отношении особым случаем является турбокомпрессор с вспомогательным механическим или электрическим приводом.

В случае нагнетателя, использующего волну сжатия газов, мощность сжатия создается отработавшими газами, но для синхронизации нагнетателя требуется дополнительный привод. Это означает, что нагнетатель соединен с приводом одновременно как механически, так и термодинамически



Рис. 1. Центробежный нагнетатель с механическим приводом (схема):
1 – ведущий шкив вариатора; 2 – ведомый шкив вариатора, 3 – электромагнитная муфта, 4 – повышающий планетарный редуктор, 5 – компрессор, 6 – впуск воздуха, 7 – выпуск воздуха

Нагнетатели с механическим приводом

Нагнетатели с механическим приводом [1] разделяются на две категории: работающие в соответствии с принципом вытеснения и сжимающие воздух в соответствии с принципами потока и момента. Нагнетатели ДВС обычно приводятся посредством ременной передачи (зубчатым или клиновым ремнем) Они приводятся во вращение непосредственно (в случае непрерывной работы) или через муфту. До настоящего времени передаточное отношение остается постоянным во всем диапазоне частоты вращения коленчатого вала. Определенные технические преимущества мог бы дать привод с регулируемой частотой вращения Однако, предыдущие попытки применения такого привода в серийно выпускаемых автомобилях по различным причинам оказались безуспешными.

Центробежный нагнетатель с механическим приводом

Центробежный нагнетатель с механическим приводом в основном состоит из рабочего колеса, закрепленного на вале с ременным шкивом. В целях согласования работы нагнетателя и двигателя в последних разработках были применены вариаторы скорости и отключаемая муфта (система «Turmat», рис. 1) Ведущий шкив вариатора приводится во вращение непосредственно от коленчатого вала двигателя. Усилия пружин шкивов вариатора и натяжения приводного ремня согласованы таким образом, что при низкой частоте вращения коленчатого вала ведомый шкив на компрессоре вращается быстрее, чем ведущий шкив. По мере увеличения частоты вращения коленчатого вала передаточное отношение непрерывно уменьшается.

Компрессор нагнетателя с механическим приводом работает в соответствии с принципом потока. Устройства такого типа очень эффективны и имеют наилучшее соотношение между размерами и производительностью по сравнению с другими нагнетателями с механическим приводом. Достижимая степень повышения давления зависит от окружной скорости рабочего колеса компрессора. Пропускная способность систем воздухозабора легковых автомобилей ограничивает размеры рабочего

колеса компрессора, что вызывает необходимость в увеличении его скорости вращения для получения степени повышения давления, необходимой для эффективного наддува.

Поскольку скорость вращения ведомого шкива (при передаточном отношении относительно ведущего шкива 2:1) недостаточна для работы центробежного нагнетателя, для достижения требуемой окружной скорости рабочего колеса используется дополнительный повышающий редуктор с передаточным отношением 15:1 или более. Кроме того, этот редуктор должен быть снабжен высокоэффективным регулятором скорости вращения для обеспечения относительно неизменной степени повышения давления в широком диапазоне частоты вращения коленчатого вала и создания высокого давления наддува уже при низких частотах вращения.

Область применения центробежных нагнетателей с механическим приводом ограничивается технически высокими требуемыми скоростями вращения и доступной мощностью привода и экономически - сравнительно высокими затратами. Они устанавливаются в небольших количествах на автомобилях, ориентированных исключительно на высокие рабочие характеристики.

Вытеснительный нагнетатель

Было предложено относительно большое количество конструкций устройств, работающих в соответствии с принципом вытеснения, но только несколько из них нашли применение в серийном производстве автомобилей. Вытеснительные нагнетатели могут работать с внутренним сжатием или без него. К нагнетателям с внутренним сжатием относятся поршневые, винтовые и роторно-поршневые компрессоры. Примером нагнетателя без внутреннего сжатия воздуха является нагнетатель Рутса (Roots). Все эти нагнетатели вытеснительного типа имеют примерно одинаковые характеристики, показанные здесь на примере нагнетателя Рутса (см. рис. 2).

- Кривые частоты вращения вала при n_{COM} = const на диаграмме p_2/p_1-V очень крутые, т.е. объемный расход V очень незначительно снижается по мере увеличения степени повышения давления p_2/p_1. Снижение объемного расхода в основном определяется качеством уплотнения зазора (потерями на противоток) и является функцией отношения p_2/p_1 и времени, но не зависит от скорости вращения вала компрессора.
- Отношение давлений p_2/p_1 не зависит от частоты вращения. То есть высокие значения этого отношения могут быть получены и при низких объемных расходах.
- Объемный расход V не зависит от степени повышения давления и, грубо говоря, прямо пропорционален скорости вращения.
- Производительность нагнетателя остается неизменной во всем его рабочем диапазоне. Компрессор вытеснительного типа работает во всех точках диаграммы p_2/p_1-V, как определено размерами нагнетателя.

Для создания данного объемного расхода размеры объемных нагнетателей с механическим приводом в общем случае должны быть значительно больше размеров центробежных нагнетателей.

Нагнетатель Рутса

Нагнетатель Рутса представляет собой роторно-поршневую машину с поршнями, вращающимися в противоположных направлениях, установленными в роликовых подшипниках и синхронизированными при помощи зубчатых колес. Вращающиеся поршни имеют одинаковую скорость вращения и не контактируют друг с другом в корпусе (см. рис. 3). Эффективность машины в основном определяется величиной зазоров между этими компонентами.

Нагнетатели Рутса работают без внутреннего сжатия. Для снижения уровня шума на сторонах всасывания и нагнетания обычно устанавливаются глушители. Они ограничивают достижимые степени повышения давления до уровня не более 2. Повысить эффективность позволило нанесе-

Рис. 2. График рабочих характеристик нагнетателя Рутса:
p_1 – общее давление на входе компрессора;
p_2 – общее давление на выходе компрессора,
n_c – частота вращения нагнетателя



ние покрытий на функциональные компоненты. В настоящее время ведутся исследования целесообразности установки редукторов с регулируемой скоростью вращения на стороне привода.

Винтовой нагнетатель

Конструкция винтового нагнетателя (рис. 4) сходна с конструкцией нагнетателя Рутса, т.е. он является роторно-поршневой машиной с двумя вращающимися в противоположных направлениях валами. Однако, он отличается от нагнетателя Рутса тем, что работает без внутреннего сжатия. Он может давать более высокие степени повышения давления, чем нагнетатель Рутса. На стороне всасывания (впуска) во время вращения поршней открывается профильное пространство, которое заполняется всасываемым воздухом. По мере того как роторы продолжают вращаться, пространство непрерывно сокращается в объеме до тех пор, пока оно не достигает краев выпускного объема. На этой стадии внутреннее сжатие завершается, и сжатый объем вытесняется на сторону нагнетания (выпуска). Для сведения к минимуму утечек необходимо строго соблюдать допуски зазоров между роторами и стенками. Рассматриваются меры по повышению эффективности нагнетателя этого типа, аналогичные описанным выше для нагнетателя Рутса.

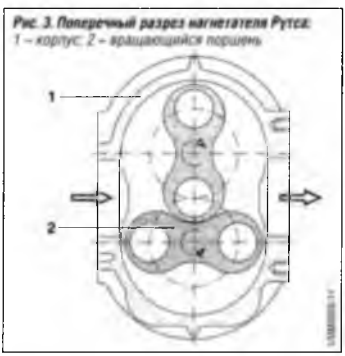


Рис. 3. Поперечный разрез нагнетателя Рутса:
1 – корпус; 2 – вращающийся поршень



Рис. 4. Нагнетатель винтового типа:
1 – впуск; 2 – роторы; 3 – выпуск

Спиральный нагнетатель

Спиральный нагнетатель (рис. 5) представляет собой компрессор, в котором ротор со спиральными лопастями описывает эксцентричную траекторию в корпусе, также снабженный спиральными лопастями. В спиральном нагнетателе используются циркуляционные вытеснительные элементы. При этом последовательно осуществляются следующие операции: рабочие камеры открываются и в них поступает воздух; отсекается подача воздуха; рабочие камеры открываются снова для выпуска сжатого воздуха через центральное окно.

Примером нагнетателя этого типа является G-нагнетатель. Ротор нагнетателя эксцентрично приводится во вращение кулачком, установленным на главном центральном вале. Вспомогательный вал, приводимый во вращение через ременную передачу, обеспечивает равномерное эксцентричное вращение ротора. Смазка приводного вала осуществляется из контура системы смазки двигателя. Эффективность нагнетателя зависит от соблюдения очень строгих допусков размеров и качества уплотнений. Радиальное уплотнение обеспечивается за счет минимально возможных зазоров, а осевое уплотнение – за



Рис. 5. Поперечный разрез нагнетателя спирального типа:
1 – впуск воздуха во вторую рабочую камеру; 2 – приводной вал; 3 – направляющая вытеснителя; 4 – впуск воздуха в первую рабочую камеру, 5 – корпус; 6 – вытеснительный элемент

счет уплотнительных полос, устанавливаемых на торцевых поверхностях. Эти уплотнительные полосы являются изнашиваемыми компонентами и при необходимости подлежат замене во время выполнения регулярного технического обслуживания автомобиля. Внутреннее сжатие может быть достигнуто за счет надлежащей конфигурации спиралей.

Последние разработки направлены на упрощение конструкции (исключение вспомогательного вала) и применение отключаемой муфты.

Нагнетатель Ванкеля

Нагнетатель Ванкеля (рис. 6) представляет собой роторно-поршневую машину, работающую на внутренней оси. Внутренний ротор приводится во вращение по эксцентриковой траектории в цилиндре, где размещаются наружные роторы. Передаточное отношение между роторами составляет 2 : 3 или 3 : 4. Роторы вращаются в противоположных направлениях, не контактируя друг с другом или с корпусом. Вращение ротора-поршня по эксцентриковой траектории позволяет нагнетателю впускать максимально возможный объем воздуха для сжатия (камера I) и выпускать его (камера III). Степень сжатия определяется положением кромки А выпускного окна.

Для синхронизации движения внутреннего ротора-поршня и наружных роторов используется шестеренчатая передача с внутренним зацеплением. Для смазки шестерен и роликовых подшипников применяется консистентная смазка. Внутренний и наружный роторы имеют уплотнения зазоров и определенной формы покрытие. Поршневые кольца служат в качестве уплотнения между рабочей камерой и корпусом шестеренчатой передачи.

Рис. 6. Поперечный разрез нагнетателя Ванкеля:
1 – корпус; 2 – наружный ротор; 3 – внутренний ротор-поршень; 4 – кромка а выпускного окна; 5 – камера III; 6 – камера II; 7 – камера I



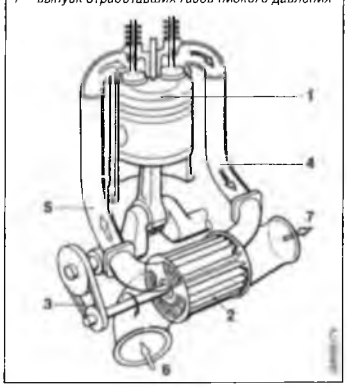
Нагнетатели, приводимые волновым давлением газа

Конструкция и принцип действия

Нагнетатель, приводимый волновым давлением газа (рис. 7) представляет собой газодинамическую машину, основным компонентом которой является ротор с открытыми каналами, расположенными коаксиально по его окружности («секционное колесо» или «ротор») [2, 3]. Через отверстия для впуска и выпуска свежего воздуха и отработавших газов и торцевые поверхности ротора осуществляется повышение давления в каналах. Свежий воздух сжимается в каналах ротора в ходе газодинамических процессов. В ходе этого процесса свежий газ и отработавшие газы кратковременно вступают в контакт друг с другом. Существенно важным для функционирования является тот физический факт, что процесс газодинамического сжатия происходит в течение значительно более короткого периода времени, чем время смешивания двух газовых потоков.

Принцип действия нагнетателя, приводимого в действие волновым давлением газа, основан на том, что волна давления на открытом конце отражается, как волна разрежения, а на закрытом конце – как волна давления; это также относится к отражению волны разрежения. Для контроля и поддержания этого

Рис. 7. Нагнетатель, использующий волновое давление газов:
1 – поршень двигателя; 2 – секционный ротор; 3 – приводной ремень; 4 – отработавшие газы высокого давления; 5 – воздух высокого давления, 6 – впуск воздуха низкого давления, 7 – выпуск отработавших газов низкого давления



процесса отверстия каналов должны проходить через «открытые концы» и «закрытые концы», т.е. секционный ротор должен вращаться. Мощность привода используется просто для компенсации потерь в подшипниках ротора и потерь на вентиляцию и для ускорения ротора в случае внезапного увеличения нагрузки. Путем соответствующего конфигурирования тракта прохождения газа в корпусе можно обеспечить достаточно равномерное распределение температуры в роторе с целью обеспечения достаточно малых зазоров. Акустические характеристики могут быть улучшены путем соответствующего конфигурирования секций.

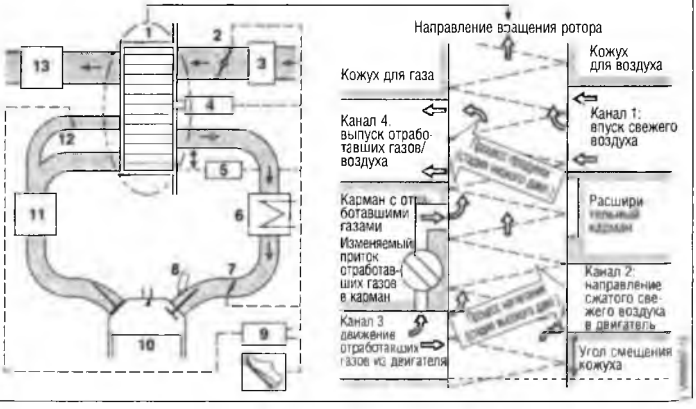
Диаграммы газовых потоков и состояний (рис. 8) иллюстрируют процессы в базовом нагнетателе, приводимом в действие волновым давлением газа при полностью открытом дросселе и умеренной частоте вращения коленчатого вала. Энергообмен в каналах происходит со скоростью звука, и благодаря используемым принципам действия нагнетатель очень быстро реагирует на изменение потребности двигателя, причем фактическое время реакции определяется процессами наддува в воздуховодах и выпускных трубах. Скорость звука, а также физические характеристики являются функцией температуры, что означает, что они в основном зависят от величины крутящего момента двигателя, а не от частоты вращения коленчатого вала.

Нагнетатель Comprex

Если передаточное отношение между двигателем и секционным ротором постоянно, что и имеет место для приводимого при помощи ременной передачи нагнетателя, волновой процесс оптимален только в определенной рабочей точке. Для устранения этого недостатка в передней части кожухов размещают специальные «карманы», позволяющие получить высокую производительность нагнетателя и оптимальную кривую наддува в относительно широком диапазоне рабочих режимов.

Ротор нагнетателя Comprex имеет постоянную смазку, а подшипник ротора расположен со стороны подвода и отвода воздуха. Воздушный кожух изготовлен из алюминия, а для газа – кожух из материала NiResist. Ротор с осевыми ячейками изготовлен методом литья по выплавляемой модели. Давление наддува регулируется в соответствии с потребностью двигателя при помощи перепускного клапана.

Рис. 8. Схема потоков газов и диаграмма состояний нагнетателя, использующего волновое давление газов: *a – схема потоков газов, b – диаграмма состояний; 1 – нагнетатель; использующий волновое давление газов; 2 – дроссельная заслонка 1; 3 – воздушный фильтр; 4 – привод ротора; 5 – смещение кожуха; 6 – промежуточный охладитель; 7 – дроссельная заслонка 2; 8 – топливная форсунка; 9 – электронный блок управления двигателем; 10 – двигатель внутреннего сгорания; 11 – трехкомпонентный каталитический нейтрализатор; 12 – заслонка газового кармана; 13 – каталитический нейтрализатор окислительного типа*



Нагнетатель Hyrgex

Дальнейшим развитием нагнетателя Comprex является нагнетатель Hyrgex, который пока что не поступил в серийное производство, но рассматривается возможность его применения на автомобилях с бензиновыми двигателями малого рабочего объема. Ротор нагнетателя Hyrgex приводится во вращение независимым электродвигателем, благодаря чему нагнетатель может быть лучше адаптирован к рабочему состоянию двигателя.

В дополнение к другим модификациям, улучшающим пуск холодного двигателя, асимметричное расположение секций позволило улучшить акустические характеристики. Газовые карманы переменного объема позволяют повысить эффективность в нижнем диапазоне частоты вращения коленчатого вала с соответствующим увеличением давления наддува. Применение нагнетателя Hyrgex требует наличия современной электронной системы управления двигателем.

Турбокомпрессоры

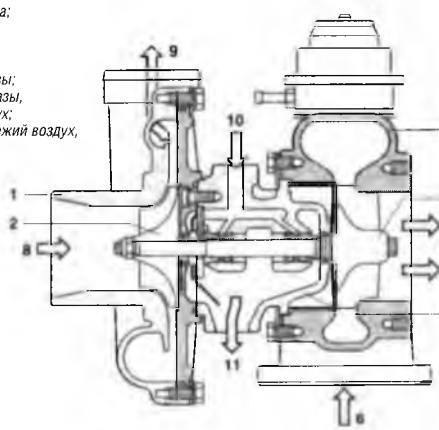
Из всех нагнетательных устройств наиболее распространенным является турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами. В то время как в настоящее время практически 100 % дизельных двигателей легковых и коммерческих автомобилей снабжены наддувом, доля бензиновых двигателей с наддувом будет значительно возрастать в течение нескольких следующих лет. Здесь также основным нагнетателем будет турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами.

Конструкция и принцип действия

Турбокомпрессор состоит из двух турбоэлементов – турбины и собственно компрессора, причем их рабочие колеса установлены на общем валу (см. рис. 9 и 10). Работа турбоэлементов основана на физическом принципе создания момента. Турбина преобразует некоторую часть энергии, содержащейся в отработавших газах, в механическую энергию, необходимую для привода компрессора. Компрессор засасывает свежий воздух через воздушный фильтр и сжимает его.

Таким образом, турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, соединен с двигателем автомобиля только термодинамически, но не механически.

Рис. 9. Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами (вид в разрезе):
1 – корпус компрессора;
2 - рабочее колесо компрессора;
3 – корпус турбины,
4 – рабочее колесо турбины;
5 – корпус подшипников;
6 – входящие отработавшие газы;
7 – исходящие отработавшие газы,
8 - свежий атмосферный воздух;
9 - предварительно сжатый свежий воздух,
10 – подача масла;
11 – возврат масла



Частота вращения ротора турбокомпрессора не зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя, но она в значительной степени определяется балансом энергии, получаемой турбиной и отдаваемой компрессору. Турбина генерирует мощность, необходимую для привода компрессора, которая в основном теряется в подшипниках, и в конечном итоге рассеивается в виде тепла (механические потери).

Области применения

Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, в его настоящей форме уходит корнями к работам Альфреда Бюхи (1905) [2], который уже тогда увидел потенциал объединения наддува и перекрытия клапанов для очистки остаточных отработавших газов. Турбокомпрессоры, приводимые в действие отработавшими газами, традиционно применялись для наддува на больших дизельных двигателях грузовых автомобилей, судов и железнодорожных локомотивов, а также сельскохозяйственных и строительных машин.

Применение на автомобильных дизельных двигателях

Первые дизельные двигатели легковых автомобилей, оборудованные турбокомпрессорами, приводимыми в действие отработавшими газами, увидели свет в середине 1970-х годов. Появление «перепускной заслонки» для регулирования давления наддува окончательно утвердило концепцию двигателя, ориентированного на крутящий момент, и позволило значительно повысить гибкость. Дальнейшее повышение рабочих характеристик легковых автомобилей было достигнуто за счет применения систем прямого впрыска топлива (1987) и турбокомпрессоров с изменяемой геометрией турбины (1996) или систем двухступенчатого турбонаддува (2004). Результатом этих инноваций стало заметное увеличение на европейских рынках доли автомобилей с дизельными двигателями. В настоящее время в Европе все дизельные двигатели легковых и коммерческих автомобилей оборудуются турбокомпрессорами, приводимыми в действие отработавшими газами и промежуточными охладителями (охладителями наддувочного воздуха).

Применение на легковых автомобилях с бензиновыми двигателями

Применение турбонаддува бензиновых двигателей первоначально оставалось резервом повышения мощности только для мощных двигателей спортивных автомобилей и из-за неадекватной управляемости («запаздывания») турбонаддув относительно редко применялся на серийно выпускаемых легковых автомобилях. Однако в дальнейшем появилась тенденция к применению турбонаддува на бензиновых двигателях малой и средней мощности. В дополнение к повышению к.п.д., одна из основных целей заключалась в том, чтобы избежать увеличения количества цилиндров и связанного с этим увеличения размеров двигателя и расхода топлива.

В отличие от дизельных двигателей, в настоящее время, хотя и в меньшей степени, применяются нагнетатели с механическим приводом

Рис. 10. Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, оборудованный перепускной заслонкой (вид в разрезе):
1 – выпуск сжатого воздуха;
2 – рабочее колесо компрессора;
3 – вал;
4 – турбина;
5 – впуск отработавших газов;
6 – перепускная заслонка с тягой управления (на входе турбины)



(по соображениям, обусловленным рынком, а также благодаря превосходным характеристикам в переходных режимах, когда требуется быстрое увеличение давления наддува). В настоящее время бензиновые двигатели с прямым впрыском топлива, оборудованные турбокомпрессорами, приводимыми в действие отработавшими газами, практически достигли уровня двигателей с нагнетателями с механическим приводом в отношении скорости увеличения давления наддува в переходных режимах.

В настоящее время для повышения мощности и крутящего момента бензиновых двигателей с небольшим рабочим объемом при относительно небольшой частоте вращения коленчатого вала применяются комбинации механического наддува и турбонаддува с использованием отработавших газов (комбинированный наддув).

В то время как турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, с изменяемой геометрией турбины является стандартным нагнетателем для дизельных двигателей, высокие температуры и затраты, связанные с использованием этой технологии, до сих пор позволяют использовать ее для бензиновых двигателей только в ограниченной степени, в некоторых сегментах рынка.

В отношении содержания вредных веществ в отработавших газах и расхода топлива, а также иных рабочих характеристик важность турбонаддува при помощи турбокомпрессоров, приводимых в действие отработавшими газами, на разрабатываемых новых двигателях с малым рабочим объемом и уменьшенным количеством цилиндров будет возрастать. Сегодня мы наблюдаем резкий рост выпуска бензиновых двигателей с турбонаддувом, и в течение нескольких следующих лет ожидается резкий рост этого сектора рынка.

Конструкция турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами

Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, состоит из трех основных узлов: центрального корпуса, компрессора и турбины. В зависимости от конструкции, турбокомпрессор может также содержать устройство для регулирования давления наддува.

Несущий корпус

В несущем корпусе находятся подшипники и уплотнения вала. В современных конструкциях применяются как радиальные, так и упорные подшипники. Радиальные подшипники представляют собой вращающиеся двойные втулки или неподвижные подшипниковые втулки. Выбор системы подшипников определяется требованиями к стабильности, потерям мощности и уровню шума.

Для демпфирования вибрации подшипниковые втулки смазываются противотоком масла («плавающая втулка»). Масло также выполняет функцию охлаждения, в особенности вала. Упорный подшипник в обычных конструкциях представляет собой втулку со шлицами, испытывающую нагрузку с обеих сторон, и смазываемую центрально или индивидуально для каждой поверхности шлицев. Подача смазочного масла осуществляется за счет соединения турбокомпрессора с системой смазки двигателя. Масло выпускается из турбокомпрессора прямо в масляный поддон картера двигателя. В настоящее время подшипниковые узлы такого типа обеспечивают скорость вращения более 300 000 мин$^{-1}$.

Ожидается, что применение роликовых подшипников даст дополнительные преимущества в отношении скорости повышения давления и более высоких давлений наддува в диапазоне частичных нагрузок. До настоящего времени роликовые подшипники использовались в качестве подшипников роторов турбокомпрессоров в основном на гоночных автомобилях. Для использования этих роторов на стандартных автомобилях необходимо решить проблемы, касающиеся срока службы и долго сохраняемых акустических характеристик. С целью дальнейшего повышения эффективности или расширения возможностей выбора мест установки, а также полного исключения возможности перелива масла, в настоящее время ведутся интенсивные разработки в области создания альтернативных конструкций подшипниковых узлов, таких как узлы на воздушных или магнитных подшипниках.

Для уплотнения масляной камеры и сведения к минимуму проникновения наддувочного воздуха («прорыва») и отработавших газов внутрь нагнетателя на валу устанавливаются поршневые кольца, которые совместно с канавками в корпусе подшипника образуют простое лабиринтное уплотнение. В некоторых особых случаях уплотняющий эффект можно повысить за счет установки дополнительного поршневого кольца на боковых сторонах компрессора и турбины, воздухонепроницаемого уплотнения или скользящих кольцевых уплотнений (до настоящего времени возможно только на холодной стороне компрессора). Современная технология уплотнений ограничивает возможности установки турбокомпрессоров, приводимых

в действие отработавшими газами, относительно небольшим диапазоном наклона. В этом отношении полезными были бы контактные уплотнения, однако до настоящего времени они не смогли быть реализованы с разумными затратами из-за высоких относительных скоростей вращения вала.

Для обеспечения эффективной работы подшипниковых узлов при умеренных наружных условиях в моторном отсеке, т.е. при температуре отработавших газов до 820 °С, никаких дополнительных мер охлаждения не требуется. Поддержание температуры ниже критических значений осуществляется применением теплового экрана и теплоизоляцией корпуса подшипника. При более высоких температурах отработавших газов, например, на бензиновых двигателях, где они могут доходить до 1050 °С, или на некоторых дизельных двигателях применяется жидкостное охлаждение корпусов подшипников.

Компрессор

Компрессор турбонагнетателей легковых и коммерческих автомобилей состоит из осевого всасывающего рабочего колеса и радиального нагнетательного рабочего колеса (центробежной конструкции) и, в общем случае, литого корпуса из алюминиевого сплава без направляющих лопастей. В корпусе поток замедляется, при этом происходит некоторое повышение давления. Для эффективной работы компрессора решающее значение имеет минимальный зазор между рабочим колесом и корпусом.

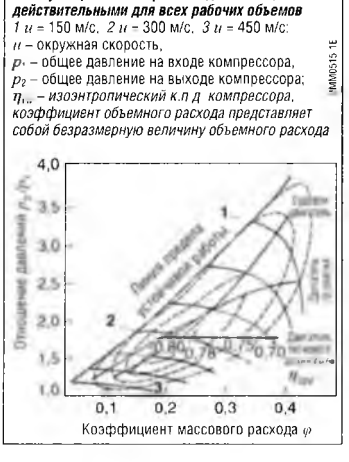
Массовое производство рабочих колес из алюминиевого сплава осуществляется с применением специального литейного процесса. В настоящее время все более широко применяются рабочие колеса из алюминиевого сплава, изготавливаемые путем ковки. В случае более строгих требований, в частности требований к сроку службы, на коммерческих автомобилях используются рабочие колеса из титанового сплава, что однако является весьма дорогостоящим. В некоторых случаях, например на двигателях, оборудованных системой рециркуляции отработавших газов низкого давления, когда в нагнетаемом компрессором воздухе содержатся отработавшие газы, на рабочее колесо наносится специальное покрытие.

Несмотря на то, что рабочее колесо компрессора вносит значительно меньший вклад в момент инерции ротора, чем колесо турбины, его величина также имеет значение на холодной стороне компрессора. Из-за высоких требований к рабочим характеристикам и сроку службы попытки применения пластмассовых рабочих колес до настоящего времени оказались безуспешными.

Характеристика компрессора описывается диаграммой, представленной на рис. 11. В отличие от нагнетателя вытеснительного типа характеристика поточного компрессора включает диапазоны, в которых его стабильная работа оказывается физически невозможной. Посредством реализации соответствующих мер эффективный диапазон, а также характеристики скорости и к.п.д. компрессора могут быть адаптированы к требуемой кривой давления наддува. Эффективный диапазон компрессора определяется на «левой» стороне диаграммы (т.е. максимальной достижимой степени повышения давления при данном расходе) границей помпажа, а на «правой» стороне (максимальная возможная производительность, ограниченная достижением скорости звука в самом узком поперечном сечении) – пределом дросселирования. Граница помпажа определяется как граница перехода из диапазона стабильных рабочих состояний в диапазон нестабильных состояний. Нестабильное состояние означает, что в результате изменения потока (обычно на стороне всасывания) инициируется процесс периодического прерывания и восстановления массового расхода воздуха.

Рис. 11. График степени сжатия с типичными эксплуатационными кривыми двигателя, действительными для всех рабочих объемов

1 u = 150 м/с, *2* u = 300 м/с, *3* u = 450 м/с:
u – окружная скорость,
p_1 – общее давление на входе компрессора,
p_2 – общее давление на выходе компрессора;
η_{is} – *изоэнтропический к.п.д. компрессора, коэффициент объемного расхода представляет собой безразмерную величину объемного расхода*



т.е. возникает эффект помпажа. Среди прочих факторов граница помпажа определяется также конструкцией впускной линии. Таким образом, граница помпажа является не характеристикой компрессора, а характеристикой системы в целом. Предел дросселирования, идентифицируемый диапазоном резко спадающих кривых скорости на диаграмме, определяется, исходя из свободного впускного поперечного сечения рабочего колеса компрессора и, следовательно, его диаметра.

Ввиду пропорциональности частоты вращения коленчатого вала и объемного расхода компрессора легко сделать вывод о том, что компрессоры для наддува бензиновых двигателей должны иметь значительно большую эффективную ширину диаграммы, например, компрессоры для больших дизельных двигателей. Представленная на рис. 11 безразмерная диаграмма демонстрирует требования к объемному расходу воздуха для двигателей легковых и коммерческих автомобилей и больших двигателей высокой мощности.

Точная аэродинамическая адаптация компрессора к соответствующим требованиям может быть осуществлена посредством модификации геометрии компонентов, где рабочее колесо и корпус должны рассматриваться как единый компонент, а критерии прочности и частоты собственных колебаний должны быть учтены в конструкции рабочего колеса. Диффузор с направляющими лопатками мог бы действительно повысить эффективность в расчетной точке, однако при идентичной геометрии отклонение от расчетной точки вызвало бы снижение эффективности. Поэтому на легковых автомобилях, ввиду большого разброса массового расхода воздуха, для наддува используются только турбокомпрессоры без направляющих лопаток.

Встроенные в корпус рециркуляционные каналы («продувка» посредством возврата части потока на вход компрессора) или геометрически согласованная конфигурация впускного канала (предварительные объемы) также используются для расширения и стабилизации рабочего диапазона.

На рабочий диапазон компрессора в пределах границы помпажа могут оказать положительное влияние различные дополнительные устройства, например, компоненты, генерирующие завихрения потока на впуске, или диффузоры с поворотными регулируемыми лопатками для устранения завихрений на выходе потока из рабочего колеса компрессора в зависимости от рабочей точки. Другими словами, благодаря этим устройствам компрессор может работать в таком рабочем режиме, в котором без этих устройств граница помпажа была бы превышена. Компрессоры с изменяемой геометрией до настоящего времени не были запущены в серийное производство, за исключением простого предварительного диффузора, лопатки которого поворачиваются на определенный угол по мере возрастания массового расхода (сил потока) и возвращаются в исходное положение по мере его снижения за счет сил упругости.

Компрессоры, предназначенные для турбонаддува бензиновых двигателей, снабжаются предохранительным клапаном, задачей которого является предотвращение помпажа при быстром снижении нагрузки (т.е. при закрытии дроссельной заслонки). Предохранительный клапан (ранее с пневматическим приводом, но в настоящее время в основном с электрическим управлением) открывает перепускной канал между впуском и выпуском компрессора таким образом, что в течение короткого времени компрессор работает как вентилятор. Сегодня посредством применения электрически управляемого регулятора давления наддува и иных мер можно предотвратить помпаж и гарантировать надежную работу компрессора без использования предохранительного клапана.

Турбина

Турбина состоит из диффузора и рабочего колеса. Диффузор турбины встроен в спиральный корпус и, если на турбокомпрессоре для легкового автомобиля установлена турбина с неизменной геометрией, диффузор не имеет лопаток. Диффузоры с фиксированной геометрией и лопатками часто применяются в турбокомпрессорах для больших двигателей для лучшего распределения потока. В диффузоре поток ускоряется и распределяется по рабочему колесу турбины как можно более равномерно.

Турбина для стандартных применений представляет собой центростремительную турбину, т.е. имеет радиальный впуск и аксиальный выпуск. Благодаря своему небольшому моменту инерции часто применяются полуаксиальные рабочие колеса. Они имеют диагональный впуск и аксиальный выпуск. В турбинах большой мощности применяются аксиальные колеса с аксиальным впуском и выпуском. Тип конструкции оказывает влияние на достижимый перепад давления, к.п.д. и иные характеристики компрессора. Вообще говоря, чем больше массовый расход, тем большие преимущества предлагает аксиальная машина. И напротив, чем меньше массовый расход воз-

духа, тем целесообразнее применение турбины с радиальным впуском.

Важную роль в процессе турбонаддува играет расположение трубопроводов отработавших газов. Традиционно проводится различие между импульсным наддувом и наддувом при постоянном давлении. В случае импульсного наддува эти трубопроводы прокладываются к корпусу турбины отдельно. Цилиндры, импульсы выпуска которых оказывают минимальное влияние друг на друга и на процесс продувки каждого цилиндра, соединяются на стороне отработавших газов. Корпус турбины имеет такую конструкцию, что разделение каналов сохраняется, насколько возможно, до впуска к рабочему колесу турбины. Поперечное сечение канала равно поперечному сечению выпуска. Импульсы давления отработавших газов передаются на турбину в форме волны давления таким образом, что энергия подводится к турбине в форме значительных пульсаций. Этот эффект может быть особенно эффективно использован при низких частотах вращения коленчатого вала, когда импульсы давления разделены вследствие больших интервалов времени между импульсами выпуска отработавших газов из цилиндров.

В случае турбонаддува при постоянном давлении отработавшие газы направляются к корпусу турбины из общего коллектора сравнительно большого объема. Этот процесс в значительной степени сглаживает отдельные импульсы давления отработавших газов.

Турбонаддув при постоянном давлении позволяет более эффективно использовать энергию системы выпуска во времени. Импульсный турбонаддув дает преимущества при частичной нагрузке двигателя и в отношении ускорения.

Конструкции корпуса турбины значительно различаются в зависимости от того, используется импульсный турбонаддув или турбонаддув при постоянном давлении. Импульсный турбонаддув в основном применяется на коммерческих автомобилях. Корпус турбины имеет двухпоточную конструкцию, в которой два потока соединяются только непосредственно перед впуском к рабочему колесу.

Турбонаддув при постоянном давлении применяется на высокооборотных двигателях, таких как дизельные двигатели для легковых автомобилей. Корпус турбины имеет однопоточную конструкцию («одинарная улитка») и частично объединен с выпускным коллектором. Это позволяет получить компактную и обтекаемую геометрию.

Для бензиновых двигателей применяется турбонаддув обоих типов. Системы выпуска отработавших газов конфигурируются соответствующим образом, а корпуса турбин имеют однопоточную или двухпоточную конструкцию. В турбокомпрессорах для бензиновых двигателей, приводимых в действие отработавшими газами , также применяются корпуса турбины, частично объединенные с выпускным коллектором. В серийное производство были запущены даже сварные конструкции (одностенные или двухстенные с изолирующим воздушным зазором, т.е. с двухстенными коллекторами из листового металла с привариваемыми к ним литыми корпусами турбины).

Чтобы они могли выдерживать высокие температуры и нагрузки, рабочие колеса турбин изготавливаются из материалов с высоким содержанием никеля путем литья в выплавляемые формы и соединяются со стальными валами ротора при помощи фрикционной или электронолучевой сварки. В качестве потенциального материала для изготовления рабочих колес турбин рассматривается алюминид титана (интерметаллическая фаза), отличающийся непревзойденными высокотемпературными свойствами. Благодаря своей низкой плотности он позволяет значительно уменьшить момент инерции колеса и изготовить колесо с поднятой задней частью без негативного влияния на характеристики турбокомпрессора в переходных режимах. Однако вследствие его хрупкости при комнатной температуре и проблематичных литейных качеств еще предстоит решить ряд проблем.

Корпуса турбин, в зависимости от рабочей температуры, изготавливаются из высоколегированного чугуна с шаровидным графитом методом литья в открытую песчаную форму. Рабочие колеса, предназначенные для работы в условиях высоких температур (до 1050°C), изготавливаются из легированных сталей методом литья в выплавляемые формы. Для изготовления тонкостенных компонентов (в целях снижения веса, затрат и тепловой инерции) используются современные процессы литья под низким давлением. Для изготовления корпусов с двойными улитками, вследствие их сложной геометрии и высоких требований к точности, требуется применение стального литья. Также были представлены корпуса турбин, изготовленные из штампованных или изготовленных методом внутренней формовки высоким давлением стальных частей, сваренных друг с другом в тонкостенную форму, или как компоненты с изолирующим воздушным зазором (AGI). Варианты

AGI позволяют снизить тепловые потери через стенки и отличаются низкой тепловой инерцией.

Составные корпуса турбин пока что в серийное производство запущены не были; однако они могли бы помочь решить задачи, связанные с будущими, все более строгими требованиями к ограничению токсичности отработавших газов. Для их внедрения кроме вопросов, связанных с массовым производством, необходимо решить проблемы гарантирования достаточно длительного срока службы и обеспечения минимального зазора между рабочим колесом и корпусом при любых рабочих условиях.

Управление процессом наддува в двигателе

Ввиду широких диапазонов частоты вращения коленчатого вала двигателей легковых автомобилей, регулирование давления наддува становится необходимым для обеспечения расчетного крутящего момента. В настоящее время стандартным методом стало регулирование производительности турбины на стороне отработавших газов.

Байпасное регулирование

Простым и широко используемым методом является байпасное регулирование, принцип которого заключается в том, что часть потока отработавших газов, через перпускную заслонку («регулятор давления наддува») направляется в обход турбины (см. рис. 10 и 12). Перепускная заслонка приводится в действие пневматическим или электрическим исполнительным механизмом. Пневматический исполнительный механизм может срабатывать от превышения давления (т.е. на него подается собственно давление наддува) или быть выполненным в виде вакуумного устройства (разрежение подается из системы автомобиля). Однако, если для управления заслонкой используется собственно давление наддува, перепускную заслонку невозможно приводить в действие независимо от рабочего состояния двигателя. В большинстве случаев регулирование осуществляется при помощи клапанов, работающих в импульсном режиме. Из-за высокой температурной нагрузки исполнительные устройства обычно устанавливаются на стороне компрессора и соединяются с рычагом заслонки управляющей тягой.

В последних разработках прослеживается четкая тенденция к применению электрических регуляторов давления наддува, которые отличаются более высоким быстродействием и точностью, а также к управлению перепускной заслонкой независимо от рабочего состояния двигателя. Это облегчает соблюдение все более строгих требований к ограничению токсичности отработавших газов и расходу топлива. Кроме того, электрические исполнительные устройства позволяют создавать прижимающие усилия, тем самым, обеспечивая герметичность перепускной заслонки при любых рабочих состояниях двигателя, что в свою очередь способствует быстрому повышению давления наддува.

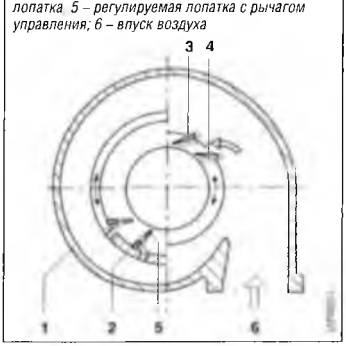
Изменяемая геометрия турбины

По сравнению с байпасным регулированием изменяемая геометрия турбины (VTG, рис. 13)

Рис. 12. Регулирование давления наддува при помощи перепускной заслонки:
1 – двигатель;
2 – турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами;
3 – регулятор давления наддува (перепускная заслонка)



Рис. 13. Турбина с изменяемой геометрией (схема):
1 – корпус турбины, 2 – регулировочное кольцо, 3 – управляющий кулачок, 4 – регулируемая лопатка, 5 – регулируемая лопатка с рычагом управления; 6 – впуск воздуха



предлагает значительно более эффективные возможности адаптации турбокомпрессора в пределах всей рабочей характеристики. Здесь через турбину проходит весь поток отработавших газов, что дает преимущества в отношении использования имеющейся в наличии энергии. Посредством изменения поперечного сечения потока (сечений турбины) осуществляется регулирование сопротивления турбины потоку и, соответственно, давления наддува.

Наибольшее признание получили конструкции с регулируемыми лопатками, так как они сочетают в себе широкий диапазон регулирования и высокий к.п.д. Угол наклона лопаток может легко регулироваться посредством их поворота. Лопатки могут поворачиваться на требуемый угол специальными кулачками или рычагами. Все лопатки вставлены в регулировочное кольцо, которое может поворачиваться при помощи рычага. В свою очередь рычаг приводится в действие пневматическим или электрическим исполнительным устройством. В случае использования пневматического исполнительного устройства, в настоящее время в состав системы обычно включается датчик положения, сигнал которого подается в систему управления двигателем.

В настоящее время применявшиеся ранее симметричные лопатки с прямой медианной линией заменили профилированные лопатки с криволинейной медианной линией и выраженными сторонами нагнетания и всасывания. Это помогает повысить эффективность, прежде всего в закрытом положении, т.е. при разгоне и в диапазоне частичных нагрузок. Для обеспечения требуемых рабочих характеристик двигателя крайне важным фактором являются минимальные зазоры в области направляющих лопаток.

Турбокомпрессоры с изменяемой геометрией турбины являются в настоящее время стандартным решением для дизельных двигателей. Применение турбокомпрессоров с изменяемой геометрией турбины на бензиновых двигателях также представляет интерес. Вследствие высокой температуры отработавших газов бензинового двигателя создание надежного и долговечного турбокомпрессора с регулируемыми лопатками связано с выполнением точного термомеханического согласования всех компонентов и применением материалов с очень высокими механическими и температурными свойствами. На 2010 год такие конструкции нашли применение только у одного производителя спортивных автомобилей.

Кроме изменяемой геометрии турбины один японский производитель использует сравнительно простое техническое решение, связанное с модификацией спирального корпуса турбины, которое, однако, не позволяет достичь уровня устройств с регулированием положения лопаток.

В дополнение к конструкциям, уже используемым в серийном производстве серийных двигателей, существует еще одна многообещающая концепция турбокомпрессора со скользящей гильзой. Эта конструкция позволяет уменьшить количество движущихся в потоке горячих газов частей по сравнению с турбокомпрессором с регулируемыми лопатками. При этом внутренний перепускной канал может быть легко открыт при помощи всего лишь одного исполнительного устройства.

Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, с подводом дополнительной энергии

Современные турбокомпрессоры, приводимые в действие отработавшими газами, характеризуются высокими уровнями к.п.д. и малым моментом инерции ротора, что позволяет получить очень хорошие скорости повышения давления наддува в переходных режимах, в особенности в сочетании с дополнительными мерами на двигателе, такими как, например, «продувка» [4]. Был предложен ряд технических решений, позволяющих в случае недостаточной энергии отработавших газов быстрее разогнать ротор компрессора, используя дополнительный механический или электрический привод.

Например, установка на вале турбокомпрессора зубчатого колеса позволяет передавать на вал дополнительную энергию от коленчатого вала через редуктор и отключаемую соединительную муфту. Что касается большой разницы скоростей вращения коленчатого вала и ротора, это представляет собой проблему для конструкторов в отношении обеспечения требуемой эффективности и долговечности.

Еще один подход предусматривает установку на роторе между подшипниками рабочего колеса турбины Пельтона, которое герметизируется подаваемым под высоким давлением (приблизительно 100 бар) моторным маслом из системы смазки двигателя или гидравлической жидкостью, подаваемой по отдельному контуру. При этом необходимо решить проблемы, связанные с присутствием в моторном масле частиц сажи, соударяющихся с высокой скоростью со стенками корпуса и лопатками, что может вызывать нарушение их прецизионной геометрии. Применение отдельного гидравлического контура связано с необходимостью

в увеличении размеров корпусов подшипников, которые должны быть эффективно отделены от других сред.

Еще одно предложение заключается в установке на валу турбокомпрессора, например, между подшипниками, электродвигателя с регулируемым приводом («турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами с вспомогательным электроприводом»). Здесь имеют место ограничения, налагаемые 12-вольтовой электрической системой автомобиля в отношении требуемого для работы привода мощности. Турбокомпрессор с вспомогательным электроприводом при некоторых условиях может работать в качестве генератора, возвращая электроэнергию в электрическую систему двигателя, однако, отказаться при этом от перепускной заслонки не представляется возможным.

Общим для всех этих подходов является то, что когда подвод дополнительной энергии не требуется, все дополнительные компоненты, установленные на вале турбокомпрессора, все равно приводятся во вращение, подвергаясь значительным тепловым нагрузкам и вызывая потери мощности. Следует продолжить рассмотрение возможности практической реализации этих подходов, а также возможности подвода дополнительной энергии независимо от рабочего состояния двигателя, но таким образом, чтобы это не вызвало изменения или сдвига рабочей характеристики применяемого компрессора. Следует также отметить, что реализация вышеописанных решений связана со значительными затратами и, следовательно, увеличением цены автомобиля. Ни один из вышеуказанных подходов не был реализован в серийном производстве.

Комплексные системы турбонаддува

При параллельном или многоступенчатом соединении нагнетателей, возможно, с применением системы клапанов для зависимого от рабочей точки двигателя управления, или определенного распределения потока отработавших газов достижимые пределы мощности наддува могут быть значительно расширены по сравнению с одноступенчатыми нагнетателями. Благодаря многоступенчатости наддува повышается эффективность подачи воздуха в цилиндры и одновременно с этим снижается удельный расход топлива двигателем.

Параллельный турбонаддув

В системах параллельного турбонаддува подача воздуха осуществляется вместо одного большого турбокомпрессора двумя или более турбокомпрессорами, соединенными параллельно. При этом каждый из турбокомпрессоров «обслуживает» определенные цилиндры двигателя, например, определенный блок цилиндров V-образного двигателя. Каждый турбокомпрессор осуществляет наддув во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала. Преимущества такой системы заключаются в быстром повышении давления наддува в переходных режимах и сравнительно компактной компоновке трубопроводов. Работающие параллельно турбонагнетатели должны быть идентичны в отношении способа автоматического регулирования.

Последовательный турбонаддув

Последовательный турбонаддув в основном используется в судовых двигателях или приводах генераторов. Однако, благодаря высоким достижимым уровням мощности, этот вариант находит применение также на легковых автомобилях. При последовательном турбонаддуве при определенном увеличении нагрузки на двигатель и скорости вращения коленчатого вала вступает в действие дополнительный турбокомпрессор (см. рис.14) Таким образом, по сравнению с одним турбокомпрессором, такая система позволяет получить более оптимальное использование энергии

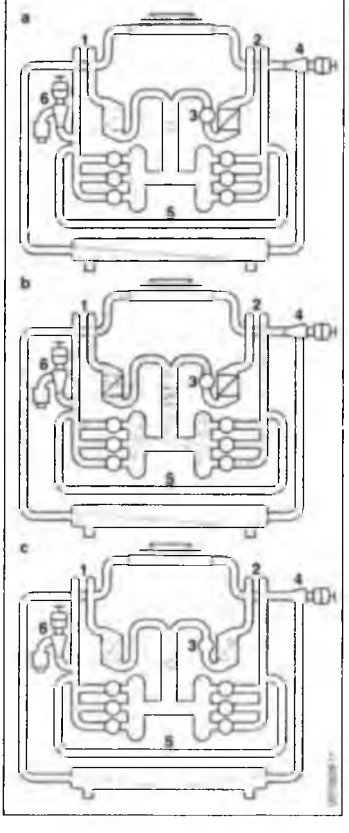
Кроме собственно турбокомпрессоров система последовательного турбонаддува включает клапаны и датчики, обеспечивающие плавный переход между режимами работы с одним или двумя турбокомпрессорами. При низких частотах вращения коленчатого вала работает только один турбокомпрессор, снабжая воздухом все цилиндры двигателя. По

достижении определенной частоты вращения коленчатого вала вступает в действие второй турбокомпрессор. Затем оба турбокомпрессора работают параллельно. Разделение подачи воздуха между двумя турбокомпрессорами позволяет обеспечить высокое быстрое повышение крутящего момента и высокую выходную мощность. Кроме того, значительно меньший момент инерции валов дополнительного турбокомпрессора меньшего размера обеспечивает более высокое быстродействие системы наддува в переходных режимах.

Следует указать, что реализация систем последовательного турбонаддува, включающих переключающие клапаны, достаточно сложна. Управление процессами переключения представляет собой достаточно сложную, но вполне выполнимую при помощи современных электронных систем управления задачу.

Последовательный турбонаддув применяется как на бензиновых, так и на дизельных двигателях [5].

Рис. 14. Последовательный наддув:
a – пуск с одним нагнетателем;
b – управляемая работа с одним нагнетателем,
c – работа с двумя нагнетателями,
1 – турбокомпрессор 1; 2 – турбокомпрессор 2,
3 – клапан подключения компрессора,
4 – клапан подключения турбины;
5 – поперечный трубопровод, 6 – перепускная заслонка



Двухступенчатый регулируемый турбонаддув

В отличие от последовательного турбонаддува, при двухступенчатом регулируемом турбонаддуве турбокомпрессоры соединены таким образом, что их последовательная работа осуществляется только при определенных рабочих состояниях (см. рис. 15). Преимущество такой системы турбонаддува, по сравнению с одноступенчатым турбонаддувом, заключается в повышении номинальной мощности при одновременном улучшении характеристики крутящего момента при низких частотах вращения коленчатого вала, благодаря быстрому повышению давления наддува. Эта чрезвычайно мощная система подразумевает использование двух турбокомпрессоров, размеры которых значительно различаются. При надлежащей настройке системы и управлении падения крутящего момента не наблюдается.

Весь всасываемый свежий воздух предварительно сжимается компрессором первой ступени. Затем наддувочный воздух сжимается компрессором высокого давления. В результате предварительного сжатия относительно небольшой компрессор высокого давления работает при повышенном давлении на входе и поэтому способен обеспечить требуемый массовый расход воздуха. Рабочие характеристики можно еще более повысить за счет охлаждения воздуха после компрессора первой ступени, однако на легковых автомобилях это пока что реализовано не было в связи с высокими затратами и ограниченным пространством в моторном отсеке.

Особенно большое значение имеют герметизация и качество перепускной заслонки. При помощи этой заслонки, в зависимости от рабочего режима, в турбине высокого давления, а затем

в турбине низкого давления расширяется весь поток отработавших газов, или часть потока отработавших газов направляется сразу к турбине низкого давления. К системе заслонок предъявляются чрезвычайно высокие требования в отношении их термомеханической и вибрационной стойкости. Также чрезвычайно важно обеспечить прохождение потока между компрессорами и турбинами с минимальными потерями давления.

В нижней части диапазона частот вращения коленчатого вала, т.е. при низком массовом расходе отработавших газов перепускная заслонка закрыта. Поток отработавших газов расширяется через небольшую турбину высокого давления, что приводит к очень быстрому нарастанию давления наддува. При увеличении частоты вращения коленчатого вала перепускная заслонка открывается, и все большая часть потока отработавших газов направляется прямо к турбине низкого давления до тех пор, пока он не направляется также в обход турбины низкого давления следующей перепускной заслонкой.

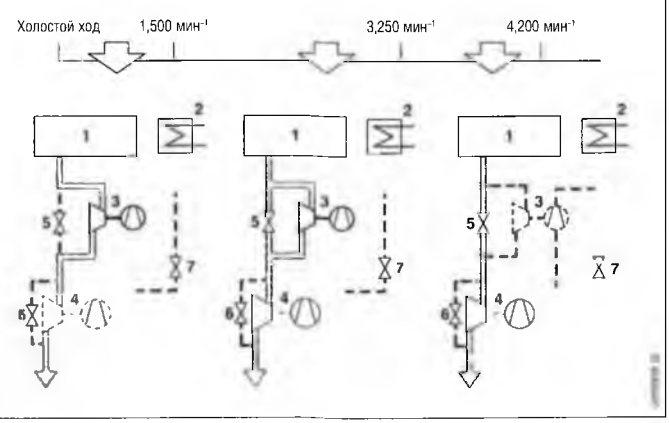
Такая двухступенчатая система наддува дает возможность бесконечно гибкой адаптации турбин к потребностям двигателя. По достижении определенной частоты вращения коленчатого вала компрессор высокого давления, несмотря на предварительное сжатие, перестает быть способным обеспечить требуемый массовый расход воздуха и начинает действовать как дроссельная заслонка. В этом случае (неуправляемая) заслонка открывает канал, идущий от компрессора низкого давления прямо к промежуточному охладителю в обход компрессора высокого давления.

Такая система турбонаддува была принята в качестве стандартной для дизельных двигателей легковых автомобилей в 2004 году. Технически возможно реализовать этот подход также и на бензиновых двигателях.

Комбинированный наддув

Система комбинированного наддува сочетает нагнетатель с механическим приводом с турбокомпрессором, приводимым в действие отработавшими газами (см. рис. 16). Эта мощная система наддува была впервые применена на легковом автомобиле в 1985 году (Lancia Delta). В настоящее время она используется на бензиновых двигателях с относительно небольшим рабочим объемом, высокой номинальной мощностью, высоким крутящим моментом уже при сравнительно низких частотах вращения коленчатого вала и высокими динамическими качествами.

Рис. 15. Схема двухступенчатого регулируемого наддува:
1 – двигатель; 2 – промежуточный охладитель; 3 – турбокомпрессор ступени высокого давления, 4 – турбокомпрессор ступени низкого давления; 5 – перепускная заслонка турбины; 6 – перепускная заслонка; 7 – перепускная заслонка компрессора



В нижней части диапазона частоты вращения коленчатого вала, когда доступная энергия отработавших газов, необходимая для привода турбины турбокомпрессора невелика, наддув практически полностью осуществляется нагнетателем с механическим приводом. Поскольку турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами, рассчитан на средние частоты вращения коленчатого вала и номинальную мощность, это обеспечивает сравнительно высокий массовый расход воздуха и, соответственно, высокие уровни эффективности. В определенном рабочем диапазоне система работает в режиме последовательного соединения двух нагнетателей, и общая степень повышения давления равна произведению степеней повышения давления отдельных нагнетателей.

Нагнетатель с механическим приводом может быть установлен в направлении потока перед турбокомпрессором или после него. Когда двигатель работает в верхней части диапазона частоты вращения коленчатого вала и, следовательно, энергия отработавших газов достаточно велика, наддув осуществляется только турбокомпрессором и воздух направляется в обход нагнетателя с механическим приводом. Поскольку в этом режиме мощность, расходуемая на привод нагнетателя с механическим приводом, отбираемая с коленчатого вала,

Рис. 17. Совместная работа компрессора с электроприводом, последовательно соединенного с турбокомпрессором, приводимым в действие отработавшими газами.
1 – двигатель внутреннего сгорания, 2 – промежуточный охладитель; 3 – перепускная заслонка турбокомпрессора; 4 – турбина турбокомпрессора, 5 – компрессор турбокомпрессора, 6 – электродвигатель; 7 – электронный блок управления электродвигателем; 8 – перепускная заслонка бустерного компрессора с электроприводом, 9 – бустерный компрессор с электроприводом; 10 – отработавшие газы; 11 – впуск воздуха

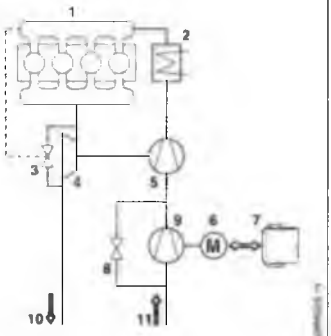
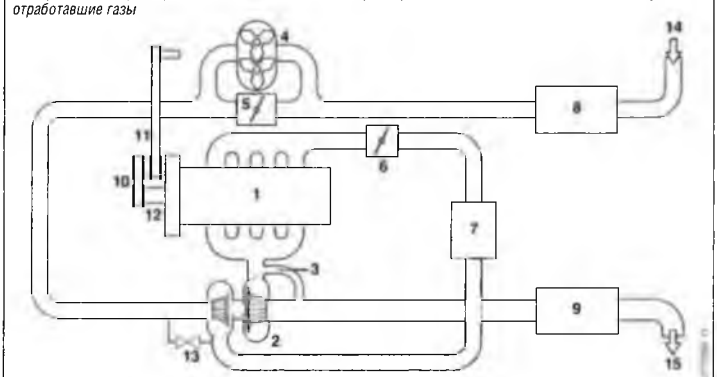


Рис. 16. Комбинированный наддув:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – турбокомпрессор; 3 – перепускная заслонка, 4 – компрессор (нагнетатель с механическим приводом); 5 – регулирующая заслонка; 6 – дроссельная заслонка; 7 – промежуточный охладитель; 8 – воздушный фильтр, 9 – каталитический нейтрализатор; 10 – ременная передача привода вспомогательных принадлежностей с соединительной муфтой; 11 – ременная передача для привода компрессора; 12 – коленчатый вал; 13 – предохранительный клапан; 14 – свежий воздух; 15 – отработавшие газы



представляет собой прямые потери, механическое отсоединение нагнетателя от коленчатого вала представляется наиболее эффективным решением. Однако, при этом предъявляются очень высокие требования к соединительной муфте, поскольку она должна передавать высокие градиенты скоростей при больших требуемых передаточных отношениях.

Совместная работа компрессора с электроприводом, последовательно соединенного с турбокомпрессором, приводимым в действие отработавшими газами

Еще одним возможным решением, направленным на реализацию потенциала наддува с использованием отработавших газов в квазистационарном режиме работы двигателя и улучшения динамической характеристики турбокомпрессора с высокой номинальной производительностью, является соединение турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами, с компрессором с электроприводом («бустером», см. рис. 17). Преимущества такого решения по сравнению с турбокомпрессором, приводимым в действие отработавшими газами с вспомогательным электродвигателем, заключается в том, что оно позволяет расширить эффективный рабочий диапазон системы и дает возможность установить бустерный компрессор в подходящем месте моторного отсека (в условиях умеренных термомеханических нагрузок). Бустерный компрессор может быть расположен в направлении потока перед турбокомпрессором или после него. Перепускная заслонка позволяет направлять воздух в обход бустерного компрессора, когда его подключение не требуется. И наконец, бустерный компрессор с электроприводом механически соединяется с двигателем через генератор и его приводной ремень; прямое соединение можно исключить при помощи, например, батареи конденсаторов.

Возможным использованием этой системы, в особенности с учетом имеющегося на обычных автомобилях запаса электроэнергии, является использование бустерного компрессора с электроприводом исключительно в переходных режимах и в нижней части диапазона частоты вращения коленчатого вала.

Для эффективной работы системы бустерный компрессор должен обеспечивать повышение давления в 1,3 раза в течение, приблизительно, 0,3 с. С учетом требуемого для этого ускорения вала это означает кратковременный бросок потребляемой мощности (в зависимости от других рабочих условий) до 2–3 кВт. Ввиду того, что напряжение в электрической системе большинства автомобилей составляет 12 В, это требует установки дополнительного дорогостоящего электрооборудования. Таким образом, качество наддува и, следовательно, эффективность этой системы в решающей степени зависят от возможностей электрической системы автомобиля.

Такая система наддува в последнее время интенсивно исследовалась и анализировалась, однако до сих пор не вышла за рамки прототипа.

Список литературы:

[1] Hiereth H.; Prenninger, P.: Aufladung der Verbrennungskraftmaschine. Springer-Verlag, 2003.
[2] Zinner, K.: Aufladung von Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Berechnungen, Ausfuhrungen. 3rd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1985.
[3] Fluckiger L.; Tafel, S.; Spring, P.: Hochaufladung mit Druckwellenlader für Ottomotoren. MTZ 12/2006, No. 67.
[4] v. Basshuysen, R. (Издатель): Ottomotor mit Direkteinspritzung. ATZ/MTZ Verlag, 2007.
[5] Portalier, J.; Blanc, JC.; Garnier, F.; Schorn, N.; Kindl, H.: Conception of PSA Twin Turbo Boosting System for 2.2 *l* Euro IV Diesel Engine. 11th Supercharging Conference 2006.
[6] Mayer, M.: Abgasturbolader – sinnvolle Nutzung der Abgasenergie. 5th Edition, Verlag Moderne Industrie, 2003.
[7] Hack, G., и Langkabel, G.-I.: Turbo- und Kompressormotoren – Entwicklung und Technik. 3rd Edition, Motorbuch Verlag, 2003.

Система выпуска отработавших газов

Конструкция и назначение

В соответствии с требованиями законодательства система выпуска отработавших газов снижает содержание загрязняющих веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания. Система выпуска отработавших газов также служит для снижения уровня шума и выпуска отработавших газов в удобном месте автомобиля. При этом потери мощности двигателя должны быть сведены к минимуму.

Компоненты

Система выпуска отработавших газов состоит из выпускного коллектора, компонентов для очистки отработавших газов, шумопоглощающих компонентов и различных соединителей этих компонентов.

Конструкция и компоновка этих компонентов на легковых и коммерческих автомобилях значительно различаются. В системах выпуска отработавших газов легковых автомобилей отдельные компоненты соединятся трубами, и вся система устанавливается под днищем автомобиля (см. рис. 1). В зависимости от рабочего объема двигателя и типа используемого глушителя система выпуска отработавших газов легкового автомобиля имеет массу от 8 до 40 кг. Поскольку компоненты системы изнутри подвергаются коррозионному воздействию горячих газов и конденсата, а снаружи – влаги и соленой воды, они в основном изготавливаются из высоколегированных сталей.

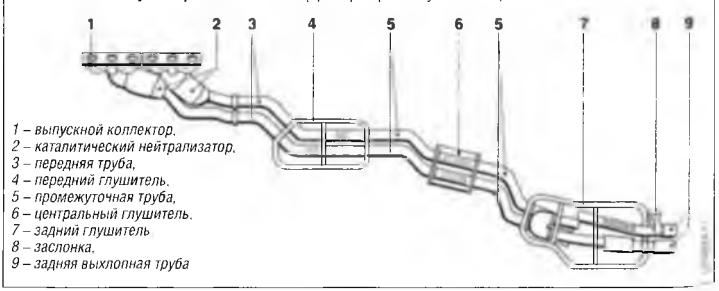
Нормы Евро-4 требуют установки компонентов для очистки отработавших газов также и на коммерческих автомобилях. Обычно эти компоненты объединены в большую систему и крепятся к раме. Отдельные компоненты описаны ниже на примере системы выпуска отработавших газов легкового автомобиля. Особенности систем выпуска отработавших газов коммерческих автомобилей будут рассмотрены в конце этого раздела.

Очистка отработавших газов

Компоненты, предназначенные для очистки отработавших газов, включают каталитический нейтрализатор, необходимый для разложения газообразных загрязняющих веществ, входящих в состав отработавших газов, и фильтр (или сажевый фильтр), предназначенный для фильтрации мелких твердых частиц (в особенности для дизельных двигателей).

Каталитические нейтрализаторы устанавливаются в системе выпуска отработавших газов как можно ближе к двигателю, чтобы они могли как можно быстрее достичь своей рабочей температуры и, следовательно, эффективно работать в условиях городского движения. Решающим фактором здесь является температура каталитического нейтрализатора, которая для трехкомпонентных нейтрализаторов составляет приблизительно 250 °C. Сажевые фильтры также устанавливаются в передней части систем выпуска отработавших газов, чтобы обеспечить более эффективное сжигание задержанных ими частиц сажи при более высоких температурах отработавших газов. Покрытия некоторых каталитических нейтрализаторов, например, нейтрализаторов аккумуляторного типа, предназначенных для нейтрализации оксидов азота (NO_x), крайне чувствительны к температуре и поэтому устанавливаются в области днища автомобиля.

Рис. 1. Система выпуска отработавших газов *(пример с тремя глушителями)*



1 – выпускной коллектор,
2 – каталитический нейтрализатор,
3 – передняя труба,
4 – передний глушитель,
5 – промежуточная труба,
6 – центральный глушитель,
7 – задний глушитель,
8 – заслонка,
9 – задняя выхлопная труба

Для двигателей с искровым зажиганием в основном применяются трехкомпонентные каталитические нейтрализаторы. Дополнительные каталитические нейтрализаторы для нейтрализации NO_x устанавливаются только на двигателях с искровым зажиганием с системой прямого впрыска топлива, работающих на бедной смеси. Для дизельных двигателей требуются окислительный каталитический нейтрализатор и сажевый фильтр. Для снижения содержания NO_x в отработавших газах требуется дополнительный аккумуляторный каталитический нейтрализатор типа SCR.

Для обеспечения максимально возможного преобразования выбросов в каталитическом нейтрализаторе или эффективной работы сажевого фильтра необходимо оптимизировать поток отработавших газов, поступающих к этим компонентам. Это обычно достигается за счет специальной формы впускной воронки. Для дальнейшей оптимизации распределения требуются такие дополнительные компоненты, как завихряющие или смесительные элементы. Для систем SCR (селективное каталитическое восстановление), в которых в систему выпуска отработавших газов впрыскивается реагент-восстановитель (добавка Adblue), требуется смеситель для обеспечения равномерного распределения газообразного NH_3 перед каталитическим нейтрализатором (см. рис. 3).

Шумопоглощение

Основной причиной генерации шума являются пульсации газов в двигателе внутреннего сгорания, т.е. вибрации газов, генерируемых в процессе сгорания топлива, и отработавших газов, вытесняемых через выпускные клапаны во время такта выпуска каждого рабочего цикла двигателя. Уровень этого вибрационного шума в некоторой степени снижается каталитическим нейтрализатором и сажевым фильтром. Однако этого оказывается недостаточно для того, чтобы уровень шума не превышал значений, предписанных соответствующими нормами. По этой причине в средней или задней секции системы выпуска отработавших газов устанавливаются специальные глушители. В зависимости от количества цилиндров и мощности двигателя, в системе устанавливаются один, два или три глушителя. На автомобилях с V-образными двигателями левый и правый блоки цилиндров часто оборудуются отдельными каталитическими нейтрализаторами и глушителями.

Пределы уровня шума для автомобиля в целом устанавливаются законодательством

Шум, производимый системой выпуска отработавших газов, составляет значительную часть общего уровня шума автомобиля. Это вызывает необходимость уделить особое внимание разработке эффективных глушителей. Хотя основной целью является снижение уровня шума до допустимых пределов, дополнительной целью может быть создание специфичного для данного автомобиля «брендового» звука.

Выпускной коллектор

Важным компонентом системы выпуска отработавших газов является выпускной коллектор (см. рис. 2). Он служит для вывода отработавших газов по выпускным каналам цилиндров в систему выпуска отработавших газов. Геоме-

Рис. 2. Выпускной коллектор с каталитическим нейтрализатором:
1 – выпускной коллектор, 2 – лямбда-зонд, 3 – металлический монолит 4 – изолирующая оболочка, 5 – датчик системы бортовой диагностики (ОВД)

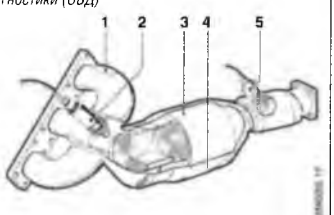
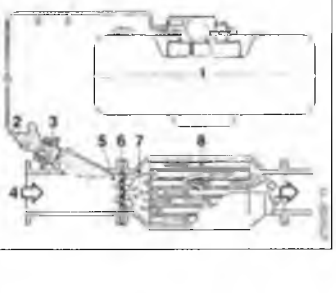


Рис. 3. Распыление и испарение реагента-восстановителя в системе SCR:
1 – резервуар для реагента-восстановителя, 2 – соединитель форсунки реагента-восстановителя; 3 – форсунка реагента-восстановителя , 4 – поток отработавших газов, 5 – выхлопная труба, 6 – смеситель, 7 – впускная воронка, 8 – каталитический нейтрализатор типа SCR



трическая форма и размеры выпускного коллектора (т.е. длина и сечения отдельных труб) оказывает влияние на рабочие характеристики двигателя, акустические характеристики системы выпуска отработавших газов и температуру отработавших газов. В некоторых случаях выпускной коллектор даже имеет дополнительную теплоизоляцию для быстрого повышения температуры отработавших газов до рабочего уровня температуры каталитического нейтрализатора.

Каталитический нейтрализатор отработавших газов

Каталитический нейтрализатор состоит из впускной воронки, выпускной воронки и монолита (см. рис. 4). Монолит содержит большое количество очень тонких, параллельных каналов, покрытых активным катализатором. Плотность каналов составляет от 60 до 190 ячеек на кв. см. Принцип действия активного каталитического слоя описан ниже (см. «Каталитическая очистка отработавших газов»).

Монолит может представлять собой металлический или керамический материал.

Металлический монолитный блок

Металлический монолитный блок изготавливается из гофрированной металлической фольги толщиной 0,05 мм, намотка и пайка которой твердым припоем осуществляется при высокой температуре. Благодаря очень тонким стенкам между каналами, металлический монолитный блок оказывает отработавшим газам чрезвычайно низкое сопротивление. Это свойство часто используется на автомобилях с двигателями большой мощности. Металлический монолитный блок может быть приварен непосредственно к воронкам.

Керамический монолитный блок

Керамический монолитный блок изготовлен на основе кордиерита. В зависимости от плотности ячеек, толщина стенок между каналами составляет от 0,05 мм (при плотности 190 ячеек/кв. см) до 0,16 мм (при плотности 60 ячеек/кв. см).

Керамические монолитные блоки обладают чрезвычайно высокой стойкостью к высоким температурам и тепловым ударам. Однако они не могут устанавливаться непосредственно в металлическом корпусе и требуют специальных креплений. Эти крепления необходимы для компенсации различных коэффициентов температурного расширения стали и керамики и защиты чувствительного монолитного блока от ударов. В процессе производства требуются чрезвычайная осторожность и внимание, в особенности в отношении тонкостенных монолитных блоков (< 0,08 мм). Монолитный блок устанавливается на мате, находящемся между металлическим кожухом и монолитным блоком. Монтажный мат изготавливается из керамического волокна. Он обладает высокой эластичностью, что необходимо для сведения к минимуму механических нагрузок на монолитный блок. Монтажный мат также служит в качестве теплоизолятора.

Один каталитический нейтрализатор может содержать несколько монолитных блоков с различными покрытиями. Для обеспечения равномерного прохождения отработавших газов через монолитный блок особое внимание следует уделить форме впускной воронки Внешняя форма керамического монолитного

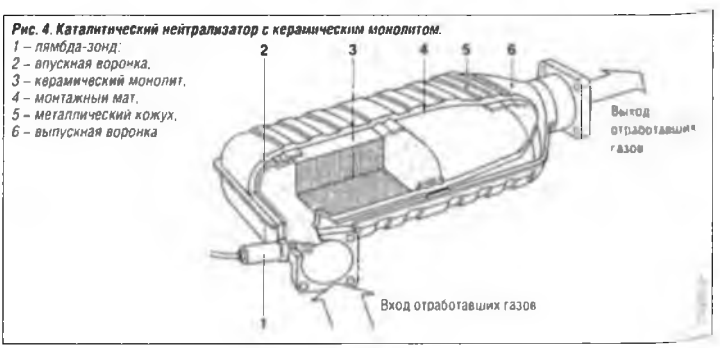


Рис. 4. Каталитический нейтрализатор с керамическим монолитом.
1 – лямбда-зонд;
2 – впускная воронка,
3 – керамический монолит,
4 – монтажный мат,
5 – металлический кожух,
6 – выпускная воронка

блока зависит от пространства под кузовом автомобиля и может быть треугольной, овальной или круглой.

Сажевый фильтр

Так же как монолиты каталитических нейтрализаторов, сажевые фильтры могут быть металлическими и керамическими. Методы установки и крепления фильтра в металлическом корпусе аналогичны методам, применяемым в отношении монолита каталитического нейтрализатора.

Так же как монолит каталитического нейтрализатора, керамический сажевый фильтр состоит из большого количества параллельных каналов. Однако, в этом случае эти каналы попеременно перекрыты (см. рис. 5). Поэтому отработавшие газы вынуждены проходить через пористые стенки сотовой структуры. Сажевые частицы при этом осаждаются в порах стенок. В зависимости от пористости керамического тела эффективность фильтрации этих фильтров может достигать 97 %.

Отложения сажи в сажевом фильтре вызывают постепенное увеличение сопротивления потоку. По этой причине сажевый фильтр необходимо периодически регенерировать с использованием двух различных процессов. Детали этих процедур описаны ниже (см. «Очистка отработавших газов», системы управления дизельными двигателями).

Пассивный процесс

В пассивном процессе сажа сжигается в ходе каталитической реакции. Для обеспечения этого процесса служит добавка к дизельному топливу, которая снижает температуру воспламенения частиц сажи до обычной температуры отработавших газов.

Другие варианты пассивной обработки включают сажевые фильтры с каталитическим покрытием или процесс CRT (непрерывная регенерация).

Активный процесс

В ходе активного процесса осуществляется внешний нагрев фильтра до температур, необходимых для выжигания сажи. Этот нагрев может осуществляться при помощи горелки, установленной перед фильтром, или посредством дополнительного впрыска топлива, инициируемого системой управления двигателем, и использования предварительного каталитического нейтрализатора.

Глушители

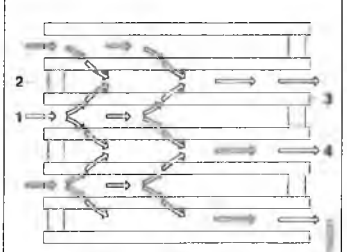
Глушители предназначены для сглаживания пульсаций в потоке отработавших газов и максимально возможного снижения шума на выпуске. В глушителях применяются в основном два физических эффекта – резонанс и звукопоглощение. Глушители различаются в зависимости от используемого эффекта. Однако, в основном в глушителях используется сочетание эффектов отражения и поглощения звука (см. рис. 6).

Так как глушители вместе с выхлопными трубами образуют звуковой генератор с собственной резонансной частотой, их расположение влияет на уровни шумопоглощения. Желательно располагать выпускную систему под днищем кузова как можно дальше от кузова, чтобы частота собственных колебаний системы не приводила к резонансным колебаниям в кузове автомобиля. Для максимального снижения звуковых колебаний в кузове и теплоизоляции днища кузова от выпускной системы глушители часто изготавливают с двойными стенками и теплоизолирующим покрытием.

Глушители резонансного типа

Глушитель резонансного типа состоит из ряда камер различной длины, соединенных друг с другом трубами (см. рис. 6, а и 7). Трубы и перегородки сделаны перфорированными, что позволяет отработавшим газам проходить через них. Разность сечений труб и камер, отклонение отработавших газов и резонаторы, образуемые соединительными трубами и камерами, вызывают наложение звуковых волн и их частичное ослабление.

Рис. 5. Керамический сажевый фильтр:
1 – впуск отработавших газов;
2 – керамическая заглушка,
3 – перегородка,
4 – выпуск очищенных отработавших газов



Таким образом, может быть достигнуто эффективное снижение уровня шума, особенно в диапазоне средних и низких частот. Чем больше в глушителе камер, тем эффективнее процесс глушения шума.

Глушители поглотительного типа

Глушители поглотительного типа имеют одну камеру, через которую проходит перфорированная труба (см. рис. 6, b). Камера заполнена звукопоглощающим материалом (базальт или стекловолокно). Звуковые колебания через отверстия в перфорированной трубе взаимодействуют со звукопоглощающим материалом и преобразуются в теплоту.

Звукопоглощающий материал обычно состоит из длинноволоконной минеральной ваты с объемной плотностью от 100 до 150 г/л. Степень глушения шума зависит от плотности, звукопоглощающих свойств материала, а также длины и толщины стенки камеры. Глушение происходит в широком диапазоне звуковых частот.

Выдувание звукопоглощающего материала наружу отработавшими газами предотвращается за счет правильного выбора формы перфораций и благодаря тому, что труба проходит через минеральную вату. Иногда минеральная вата бывает защищена слоем стальной ваты из нержавеющей стали вокруг перфорированной трубы.

Поскольку отработавшие газы в глушителе поглотительного типа в основном проходят по прямой трубе, перепад давления на нем значительно ниже, чем на глушителе резонансного типа.

Конструкция глушителя

В зависимости от наличия свободного пространства под кузовом автомобиля, глушители имеют спирально намотанную оболочку или собираются из полуоболочек.

При изготовлении спирально намотанной оболочки одна или несколько заготовок из листового металла оборачиваются вокруг круглой оправки и соединяются продольными фальцами или посредством лазерной сварки. Затем в оболочку устанавливается полностью собранная и сваренная сердцевина. Она состоит из внутренних трубок, отражателей и промежуточных слоев. Затем наружные слои соединяются с оболочкой посредством фальцовки или лазерной сварки.

Рис. 6. Принцип действия глушителей:
a – глушитель резонансного типа,
b – глушитель поглотительного типа;
c – комбинация глушителей резонансного и поглотительного типа, 1 – впускная труба; 2 – перфорированная труба, 3 – камера; 4 – сопло вентури, 5 – звукопоглощающий материал

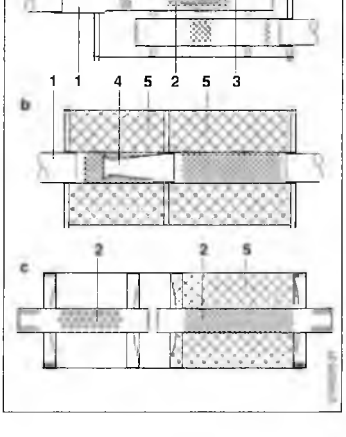
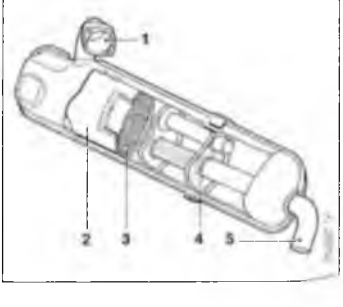


Рис. 7. Глушитель с встроенным каталитическим нейтрализатором:
1 – впускная труба;
2 – монтажный мат;
3 – керамический монолитный блок;
4 – резонансный глушитель;
5 – выхлопная труба



Часто глушитель со спирально намотанной оболочкой оказывается невозможно разместить в предусмотренном для него месте ввиду сложной формы доступного пространства в днище автомобиля. В таких случаях используются составные глушители, состоящие из двух полуоболочек, изготовленных методом глубокой вытяжки. Такие глушители могут принимать практически любую требуемую форму.

Общий объем глушителей системы выпуска отработавших газов легкового автомобиля равен приблизительно от восьми до двенадцати рабочих объемов двигателя.

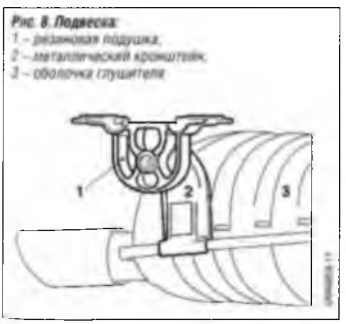


Рис. 8. Подвеска:
1 – резиновая подушка;
2 – металлический кронштейн;
3 – оболочка глушителя

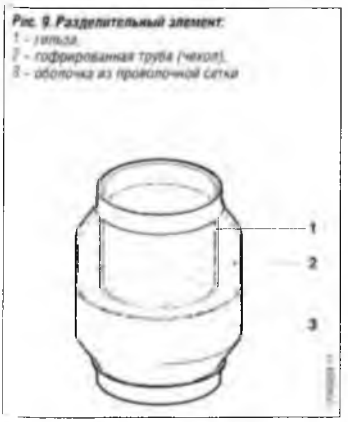


Рис. 9. Разделительный элемент:
1 – гильза;
2 – гофрированная труба (чехол);
3 – оболочка из проволочной сетки

Соединительные элементы

Для соединения каталитического нейтрализатора и глушителей используются трубы. На автомобилях с двигателями очень низкой мощности могут использоваться конструкции, в которых каталитический нейтрализатор и глушитель встроены в один общий корпус.

Трубы, каталитический нейтрализатор и глушители соединяются посредством втулок и фланцев. Многие системы являются полностью сварными, что позволяет ускорить их установку.

Вся система выпуска отработавших газов крепится к днищу автомобиля при помощи эластичной подвески (см. рис. 8). Так как вибрации от выпускных труб, вызываемые выпуском отработавших газов, могут передаваться на кузов и повышать шумность в салоне, то места крепления системы выпуска должны тщательно выбираться. Неправильно выбранные точки крепления могут создать проблемы с прочностью и, следовательно, долговечностью системы. В некоторых случаях эти проблемы могут быть решены при помощи амортизаторов вибраций. Колебания этих компонентов находятся в противофазе с колебаниями компонентов системы выпуска отработавших газов, эффективно поглощая их вибрацию.

Акустические колебания, генерируемые системой выпуска отработавших газов в точке выпуска газов наружу (задняя выхлопная труба), а также в области глушителей, могут вызывать резонанс кузова. В зависимости от интенсивности вибрации двигателя, могут использоваться разделительные элементы (см. рис. 9), служащие для изоляции системы выпуска отработавших газов от двигателя и снятия напряжений с компонентов системы выпуска отработавших газов. Разделительный элемент включает гильзу, состоящую из отрезков труб, один из которых может перемещаться внутри другого. Поверх гильзы устанавливается гофрированная труба, также называемая чехлом. Гильза служит для защиты чехла и ограничения линейного растяжения. Гофрированная труба выполняет функции разделения/изоляции за счет своей упругой структуры. Гофрированная труба защищена от внешних воздействий при помощи оболочки из проволочной сетки.

Таким образом, система выпуска отработавших газов с одной стороны должна быть достаточно жесткой, чтобы выдерживать вибрацию, а с другой стороны обладать достаточной гибкостью, чтобы в максимальной степени исключить передачу усилий на кузов.

Устройства, задающие акустические параметры глушителей

Используются для снижения отдельных спектральных составляющих нежелательных частот в шуме выпуска. Эти компоненты могут быть использованы для эффективного ослабления звука в тех или иных диапазонах частот.

Резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца состоит из трубы, расположенной вдоль направления движения отработавших газов и определенного присоединенного к ней объема (см. рис. 10). Объем газа действует в качестве пружины, в то время как газ, находящийся в трубной секции, действует в качестве массы. При резонансной частоте такая система массы и пружины обеспечивает очень высокую степень ослабления звука в узкой полосе частот. Резонансная частота f зависит от величины объема V, а также от длины L и площади поперечного сечения A трубы:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{L\,V}},$$

где c – скорость звука.

Резонаторы $\lambda/4$

Резонатор $\lambda/4$ включает закрытую с одной стороны трубу, ответвляющуюся от системы выпуска отработавших газов. Резонансная частота f такого резонатора зависит от длины отвода L и определяется как:

$$f = \frac{c}{(4L)}.$$

Эти резонаторы также обеспечивают высокую степень ослабления звука в узкой полосе частот вокруг их резонансной частоты.

Заслонки отработавших газов

Заслонки отработавших газов чаще всего устанавливаются в задних глушителях. В зависимости от частоты вращения коленчатого вала или интенсивности потока отработавших газов заслонка открывает или перекрывает перепускную трубу глушителя или вторую выхлопную трубу (см. рис. 11). В результате уровень шума отработавших газов при низких частотах вращения коленчатого вала может быть значительно снижен без потерь мощности при высоких оборотах.

Заслонки могут быть саморегулирующимися в зависимости от давления и скорости отработавших газов или иметь внешнее управление. В последнем случае необходимо обеспечить интерфейс с системой управления двигателем. Это делает систему более сложной, но в то же время расширяет область ее применения.

Литература

Hageluken, C.: Autoabgaskatalysatoren, Band 612. Expert-Verlag, 2009.

Рис. 10. Резонатор Гельмгольца:
1 – объем Гельмгольца;
2 – газонесущая выхлопная труба,
3 – трубка гельмгольца,
4 – оболочка глушителя

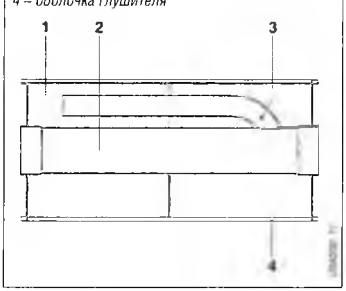
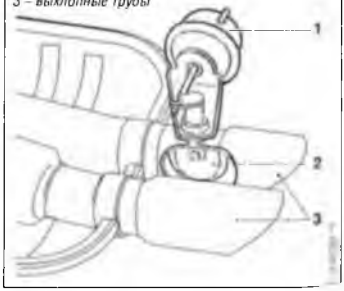


Рис. 11. Заслонка отработавших газов, управляемая наружным разрежением:
1 – вакуумное устройство;
2 – дроссельная заслонка;
3 – выхлопные трубы



Системы выпуска отработавших газов коммерческих автомобилей

В системах выпуска отработавших газов коммерческих автомобилей большинство описанных выше компонентов встроено в корпус, который крепится к раме автомобиля. Количество каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров зависит от того, в соответствии с какими нормами законодательства разработана система выпуска отработавших газов.

Система выпуска отработавших газов, отвечающая требованиям Евро-4 и Евро-5

Вообще говоря, сажевый фильтр для систем, отвечающих требованиям Евро-4 и Евро-5 не требуется. В таких системах используются только окислительные каталитические нейтрализаторы и нейтрализаторы типа SCR. В качестве альтернативного решения дизельный двигатель может быть отрегулирован таким образом, чтобы содержание необработанных NO_x в отработавших газах не превышало предельных значений, предусмотренных нормами Евро-4 и Евро-5. Однако в этом случае требуется наличие в системе выпуска отработавших газов сажевого фильтра. На рис. 12 показана система выпуска отработавших газов, отвечающая требованиям норм Евро-4 с каталитическими нейтрализаторами типа SCR. В отличие от систем выпуска отработавших газов легковых автомобилей, здесь часто используются несколько каталитических нейтрализаторов, установленных параллельно, с тем чтобы обеспечить требуемую площадь поверхности катализатора в доступном пространстве. Для маршрутизации отработавших газов и глушения шума служат перепускные трубы и отверстия. В зависимости от размера двигателя такие системы имеют объем от 150 до 200 *л* и массу порядка 150 кг.

Система выпуска отработавших газов, отвечающая требованиям норм Евро-6 и EPA10

Для системы выпуска отработавших газов, отвечающей требованиям последних норм (Евро-6 в Европе и EPA10 в США) требуется наличие всех компонентов, т.е. окислительных каталитических нейтрализаторов, сажевых фильтров и каталитических нейтрализаторов типа SCR (см. рис. 13). Поэтому такие системы имеют еще больший объем и вес.

В настоящее время используются две концепции. Либо все компоненты размещаются в одном корпусе, либо каталитические нейтрализаторы и сажевые фильтры размещаются в двух различных корпусах. Для обеспечения требуемой очистки отработавших газов используются следующие дополнительные компоненты. Для обеспечения функции SCR (селективное каталитическое восстановление) требуется система дозирования мочевины, сопло (форсунка) которой должно быть расположено в удобном месте системы выпуска отработавших газов. Кроме того, для обеспечения надежной регенерации сажевых фильтров часто требуется наличие дозирующего устройства для впрыска в систему топлива. В обоих случаях расположение этих устройств должно быть выбрано таким образом, чтобы было обеспечено равномерное распределение и испарение жидкой мочевины и топлива. При необходимости, для приготовления добавок используются те или иные мешалки (см. раздел «Очистка отработавших газов»).

В корпусах также необходимо разместить различные датчики. В дополнение к датчикам давления для контроля нагрузки на фильтр, для контроля процесса преобразования NO_x требуются датчики температуры и концентрации NO_x. Для обеспечения надлежащего качества сигналов при любых условиях работы расположение датчиков в системе выпуска отработавших газов должно быть оптимизировано в зависимости от конструкции системы.

Рис. 12. Система выпуска отработавших газов коммерческого автомобиля, отвечающая требованиям норм Евро-4:
1 – каталитические нейтрализаторы типа SCR; 2 –впускная труба; 3 – выпускная труба; 4 – выхлопная труба; 5 – впуск отработавших газов

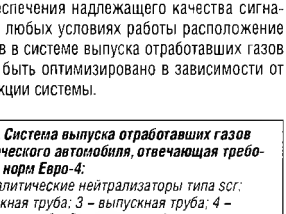


Рис. 13. Система выпуска отработавших газов коммерческого автомобиля, отвечающая требованиям норм Евро-6 / EPA 10:
1 – инжектор мочевины, 2 – разделительный элемент, 3 – форсунка углеводородов (HC), 4 – впускная труба, 5 – предварительный окислительный каталитический нейтрализатор, 6 – сажевый фильтр, 7 – последующий окислительный каталитический нейтрализатор, 8 – каталитический неитрализатор типа SCR, 9 – выпускная труба



Нормы контроля токсичности отработавших газов

Обзор

Первые нормы контроля токсичности отработавших газов вступили в силу в середине 1960-х годов в Калифорнии. В течение последующих лет эти нормы становились все более строгими. В то же время все промышленно развитые страны ввели законы об эмиссии ОГ, определяющие допустимые пределы содержания токсичных веществ в отработавших газах бензиновых и дизельных двигателей, а также циклы испытаний для определения соответствия требованиям. В некоторых странах действуют дополнительные нормы, определяющие предельно допустимые потери на испарение топлива из топливных систем бензиновых двигателей.

Наиболее важные законодательные ограничения, относящиеся к выбросам, перечислены ниже. На рис. 1 показаны регионы, в которых действуют те или иные стандарты:

- стандарт CARB (Калифорнийский совет по воздушным ресурсам);
- стандарт EPA (Агентство по защите окружающей среды), США;
- стандарт ЕС (Европейский Союз) и соответствующие нормы UN/ECE (ЕЭК ООН);
- японское законодательство

Классификация

Страны, в которых действуют законы от эмиссии ОГ, разделяют автомобили на следующие классы:

- легковые автомобили – испытания на токсичность выбросов проводятся на стенде с беговыми барабанами;
- малотоннажные грузовые автомобили (в зависимости от национальных стандартов верхний предел полной массы автомобиля составляет от 3,5 до 6,35 т) – испытания проводятся на стенде с беговыми барабанами (так же как для легковых автомобилей);
- большегрузные грузовые автомобили (полная масса – от 3,5 до 6,35 т) – испытания проводятся на стенде для испытания двигателей; дорожных испытаний на автомобилях не предусмотрено;

Рис. 1. Регионы, в которых действуют различные нормы контроля токсичности отработавших газов
(на карте показаны регионы действия законодательств, относящихся к легковым автомобилям)



- внедорожные транспортные средства (например, строительные, сельскохозяйственные и лесохозяйственные машины) – испытания проводятся на стенде для испытания двигателей, так же как для большегрузных грузовых автомобилей.

Циклы испытаний

Япония и Европейский Союз последовали за США, определив циклы испытаний с целью удостоверения соответствия требованиям законодательства. Эти циклы, в модифицированной или неизменной форме, были приняты также и другими странами.

В зависимости от цикла и цели испытаний, требования законодательства предписывают проведение трех следующих испытаний:

- типовые испытания на соответствие техническим условиям (ТА) для общей сертификации;
- выборочные испытания серийно выпускаемых автомобилей, проводимые аттестованным агентством (COP. Соответствие серийно выпускаемой продукции);
- мониторинг систем снижения токсичности отработавших газов автомобилей в реальных условиях дорожного движения.

Типовые испытания на соответствие техническим условиям

Типовые испытания на соответствие техническим условиям являются предварительным условием получения общего сертификата на тот или иной тип двигателя или модель автомобиля. С этой целью испытательные циклы должны быть выполнены при определенных рабочих условиях, и по результатам испытаний должно быть определено соответствие количества токсичных веществ в отработавших газах предельно допустимым значениям. Циклы испытаний и предельно допустимые значения определяются национальным законодательством.

Для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей предписано проведение динамических испытаний. Различия между двумя циклами, в зависимости от страны, заключаются в их источнике (см. «Испытательные циклы легковых автомобилей и грузовых автомобилей малой грузоподъемности»):

- испытательные циклы, разработанные с целью отражения реальных условий дорожного движения, например федеральный цикл испытаний (FTP) в США;
- испытательные циклы, состоящие из отдельных этапов (при постоянной скорости движения и во время ускорения), например, модифицированный новый европейский ездовой цикл (MNEDC) в Европе.

Масса токсичных выбросов каждого автомобиля определяется в соответствии с точно определенными условиями проведения испытаний. Во время выполнения цикла испытаний отработавшие газы собираются для последующего анализа и определения массы токсичных веществ (см. «Техника измерения концентраций составляющих отработавших газов»).

Для большегрузных грузовых автомобилей и внедорожных транспортных средств выполняются стационарные (например, 13-ступенчатые испытания) и динамические (например, US TC или ETC), проводимые на стенде для испытания двигателей (см. «Испытательные циклы грузовых автомобилей»).

Испытания серийной продукции

Испытания серийной продукции обычно проводятся самими производителями автомобилей в процессе производства, – это часть системы контроля качества. Как правило, применяются те же циклы испытаний и предельно допустимые значения, что и для типовых испытаний на соответствие техническим условиям. Сертифицирующий орган может требовать проведения повторных испытаний так часто, как сочтет это необходимым. Нормы ЕС и ЕЭК (Европейской Экономической Комиссии) учитывают разброс характеристик серийной продукции, требуя проведения испытаний от 3 до 32 случайно выбранных автомобилей. Самые строгие требования действуют в США, в особенности в Калифорнии, где требуется практически 100% контроль качества.

Мониторинг в реальных условиях дорожного движения

Автомобили, произведенные частными компаниями, для проведения испытаний на токсичности ОГ отбираются случайным образом. Величина пробега и возраст автомобилей должны находиться в определенных пределах. Цикл испытаний, по сравнению с типовыми испытаниями на соответствие техническим условиям, несколько упрощен.

Стандарт CARB (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили)

Предельные концентрации токсичных веществ в соответствии со стандартом CARB (Калифор-

нийский совет по воздушным ресурсам) для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей (грузовых автомобилей малой грузоподъемности – LDT) указаны в стандартах LEV I и LEV II (LEV – автомобили с низким содержанием токсичных веществ в отработавших газах и малыми потерями на испарение топлива). Стандарт LEV III планируется ввести в действие в период между 2014 и 2022 годами.

Начиная с 2004 модельного года, стандарт LEV II применяется ко всем новым автомобилям с разрешенной полной массой 14 000 фунтов (1 фунт = 0,454 кг).

Вступление в силу

После вступления в силу стандарта LEV II не менее 25% новых регистрируемых автомобилей должны быть сертифицированы в соответствии с этим стандартом. Далее, в течение каждого последующего года 25% новых регистрируемых автомобилей должны отвечать требованиям стандарта LEV II. С 2007 года все новые автомобили должны отвечать требованиям стандарта LEV II.

Нормы токсичности отработавших газов

Стандарт CARB указывает предельные концентрации в отработавших газов таких токсичных веществ, как оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), углероды неметанового ряда (NMOG), формальдегид и твердые частицы (для дизельных двигателей – стандарты LEV I и LEV II; для бензиновых двигателей – только LEV II) (см. рис. 2). Вследствие чрезвычайно низких предельно допустимых концентраций, планируемый стандарт LEV III предусматривает только общее содержание NMOG и NO_x.

Содержание токсичных веществ в отработавших газах измеряется в ходе цикла испытаний FTP 75 (федеральный цикл испытаний). Предельные концентрации токсичных веществ коррелируют с пройденным расстоянием и выражаются в граммах на милю.

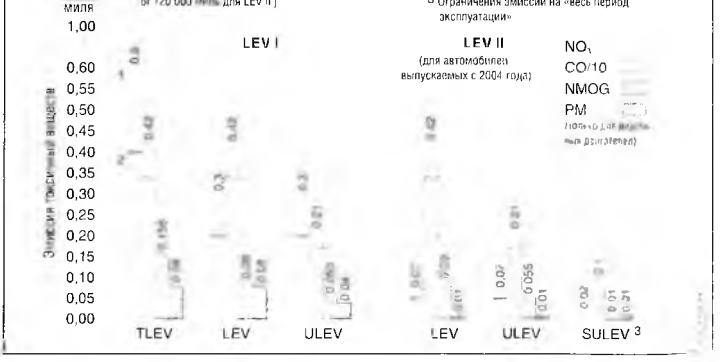
В течение периода с 2001 по 2004 годы были введены в действие циклы испытаний SFTP (дополнительная федеральная цикл испытаний), а также еще два испытательных цикла. В дополнение к FTP эти циклы предписывают определение концентраций еще некоторых веществ.

Категории токсичности отработавших газов

Производители автомобилей, при условии обеспечения средних заявленных значений (см. раздел «Среднее значение»), могут свободно выдвигать различные концепции автомобилей. В зависимости от предельных концентраций NMOG, CO, NO_x и твердых частиц выделяются следующие категории:

- TLEV (переходный стандарт по нормам токсичности ОГ; только LEV I);
- LEV (низкая токсичность ОГ);
- ULEV (очень низкая токсичность ОГ);
- SULEV (ультранизкая токсичность ОГ).

Рис. 2. Категории токсичности и предельные концентрации токсичных веществ в соответствии со стандартом CARB для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей



Стандарт LEV III будет предусматривать 6 категорий, одна из которых будет более строгой, чем SULEV.

В дополнение к категориям LEV I и LEV II введены три категории ZEV, относящиеся к автомобилям, вообще не выпускающим в атмосферу отработавших газов, или с содержанием токсичных веществ в отработавших газах, близким к нулю:

- ZEV («нулевые выбросы», т.е. автомобили, вообще не производящие ОГ и выбросы в виде паров топлива);
- PZEV (частичный ZEV) - в основном соответствует категории SULEV, но с более строгими требованиями к выделению паров топлива (нулевое выделение) и более строгими критериями долгосрочной оценки;
- AT-PZEV (передовая технология PZEV), например автомобили, работающие на газовом топливе или гибридные автомобили.

С 2004 года вновь выпускаемые автомобили должны отвечать требованиям стандарта LEV II. В то же время категория TLEV будет заменена на SULEV со значительно более низкими предельно допустимыми значениями. Категории LEV и ULEV останутся. Предельно допустимые концентрации CO и NMOG по стандарту LEV I остаются без изменений, однако предел содержания NO_x по стандарту LEV II значительно ниже.

Долговечность

Для получения сертификата на данный тип автомобиля производитель должен гарантировать, что количество выбросов токсичных веществ, на которые налагаются ограничения, не превысит соответствующих предельных значений на протяжении 50 000 миль пробега или в течение 5 лет («промежуточный период эксплуатации») и 100 000 миль (LEV I) или 120 000 миль (LEV II) или в течение 10 лет («полный период нормальной эксплуатации»). Производитель также может указать величину пробега 150 000 миль, используя те же предельные значения, что и для величины пробега 120 000 миль. Если определено среднее значение содержание NMOG, производитель получает бонус (см. раздел «Среднее значение»).

Соответствующие характеристики долговечности для категорий токсичности отработавших газов ZEV, AT-PZEV и PZEV составляют 150 000 миль или 15 лет («полный период нормальной эксплуатации»).

Стандарт LEV III увеличит гарантируемую величину пробега до 150 000 миль.

Для испытаний на долговечность производитель должен предоставить две партии серийно выпускаемых автомобилей. В первую партию должны быть включены автомобили, пробег которых перед началом испытаний составляет 4000 миль. Вторую партию составляют автомобили с измеренными факторами ухудшения состояния отдельных компонентов.

В ходе испытаний на долговечность автомобили должны пройти 50 000 и 100 000 или 120 000 миль. Измерения содержания токсичных веществ в отработавших газах выполняются через каждые 5000 миль пробега. Операции технического обслуживания могут выполняться только с соответствующими интервалами.

В качестве альтернативного варианта производитель может использовать показатели ухудшения характеристик автомобиля.

Среднее значение углеводородов неметанового ряда (NMOG)

Каждый производитель автомобилей должен гарантировать, что для его автомобилей среднее содержание токсичных веществ в отработавших газах не превышает предельно допустимых значений (см. рис. 3). В качестве критерия в этом отношении используются выбросы NMOG (для стандарта LEV III - сумма $NMOG + NO_x$). Среднее значение вычисляется из средних значений для всех автомобилей, проданных в течение одного года по истечении «промежуточного периода эксплуатации». Предельные концентрации токсичных веществ различны для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей.

Значение предельной концентрации NMOG снижается каждый год. Для обеспечения соответствия требованиям производители должны в течение каждого последующего года выпускать все более «чистые» автомобили.

Требования к средним значениям NMOG применимы независимо от требований стандартов LEV I или LEV II.

Средний расход топлива

На новые автомобили, зарегистрированные в Калифорнии, распространяются правила определения расхода топлива, действующие на остальной территории США (см. стандраты EPA, раздел «Средний расход топлива»)

Автомобили, не производящие выбросов

С 2005 года в Калифорнии 10% вновь регистрируемых автомобилей должны отвечать требованиям категории ZEV (автомобили, не производящие выбросов). Полноценные ZEV-

автомобили во время работы вообще не производят никаких выбросов. К ним относятся электромобили, работающие от аккумуляторных батарей или топливных элементов.

Часть этих 10 % автомобилей могут составлять автомобили, относящиеся к категории токсичности отработавших газов PZEV (автомобили со сверхнизкой токсичностью выбросов). Эти автомобили не относятся к категории ZEV, но дают очень низкое содержание токсичных веществ в отработавших газах. В зависимости от стандарта токсичности эти вещества взвешиваются с использованием весовых коэффициентов более 0,2. При минимальном весовом коэффициенте 0,2 должны быть удовлетворены следующие требования:

- гарантия соответствия требованиям SULEV при 150 000 миль пробега или в течение 15 лет;
- гарантия на все компоненты системы снижения токсичности отработавших газов при 150 000 миль пробега или 15 лет;
- полное отсутствие выбросов в виде паров топлива (0 EVAP, «нулевые испарения»), обеспечиваемое за счет надежной герметизации топливного бака и топливной системы. Это значительно снижает количество выбросов в виде паров топлива, производимых автомобилем.

Специальные положения применяются к гибридным автомобилям с бензиновыми или дизельными двигателями и электродвигателями и автомобилям, работающим на газовом топливе (сжатом природном газе или водороде). Эти автомобили, относящиеся к категории AT-PZEV (передовая технология PZEV) также могут входить в 10 % квоту.

Мониторинг в реальных условиях дорожного движения

Внеплановый контроль

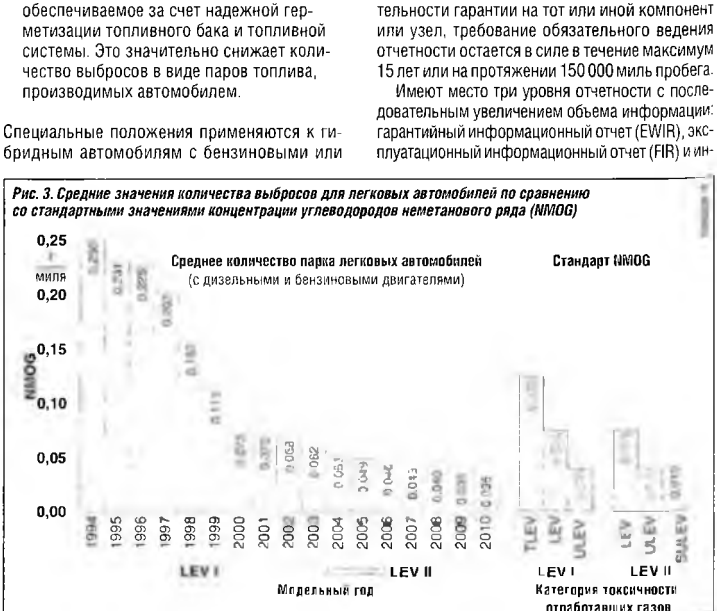
Выборочные испытания проводятся на автомобилях с применением цикла FTP 75. Для автомобилей с бензиновыми двигателями также проводится проверка выделения паров топлива. В зависимости от категории токсичности испытаниям подвергаются автомобили с пробегом 90 000 или 112 500 миль.

Мониторинг, осуществляемый производителями

С 1990 года для производителей автомобилей обязательным является официальная отчетность по претензиям или выходу из строя компонентов систем снижения токсичности отработавших газов. В зависимости от продолжительности гарантии на тот или иной компонент или узел, требование обязательного ведения отчетности остается в силе в течение максимум 15 лет или на протяжении 150 000 миль пробега.

Имеют место три уровня отчетности с последовательным увеличением объема информации: гарантийный информационный отчет (EWIR), эксплуатационный информационный отчет (FIR) и ин-

Рис. 3. Средние значения количества выбросов для легковых автомобилей по сравнению со стандартными значениями концентрации углеводородов неметанового ряда (NMOG)



формационный отчет по количеству выбросов. В агенство охраны окружающей среды передается информация о претензиях, неисправностях, факторах, влияющих на токсичность выбросов, и анализ неисправностей. На основе отчета об эксплуатации (FIR) агентство принимает решение о необходимости отзыва той или иной партии автомобилей того или иного производителя.

Стандарт EPA (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили)

Стандарт EPA (Агенство по защите окружающей среды, США) действует во всех штатах, в которых не приняты более строгие нормы Калифорнийского законодательства CARB. Нормы CARB были приняты уже в 2004 году несколькими северо-восточными штатами, такими как Мэн, Массачусетс и Нью-Йорк. К 2009 году эти нормы были приняты 16 штатами (включая Калифорнию).

Нормы EPA, действующие с 2004 года, соответствуют требованиям Tier 2.

Нормы токсичности отработавших газов

Стандарт EPA указывает предельно допустимое содержание в отработавших газах таких токсичных веществ, как оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), углеводороды неметанового ряда (NMOG), формальдегиды (HCHO) и твердые частицы (PM) (см. рис. 4). Концентрации токсичных веществ измеряются в соответствии с циклом FTP 75. Предельные концентрации токсичных веществ коррелируют с пробегом и выражаются в граммах на милю.

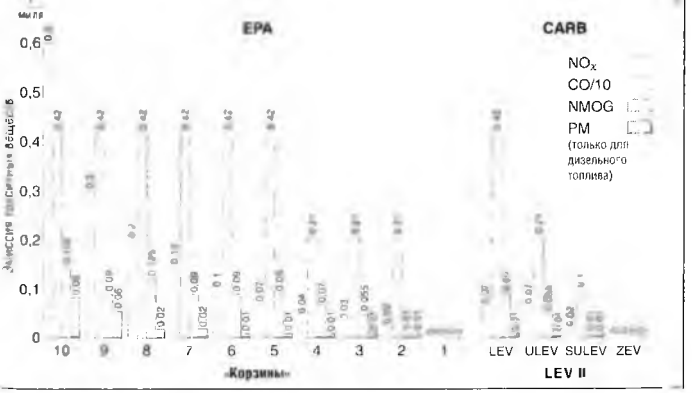
С 2000 года действует стандарт SFTP (дополнительный федеральный цикл испытаний), включающий два дополнительных испытательных цикла. Кроме предельных значений, определенных для цикла FTP, должны быть соблюдены определенные дополнительные требования. С момента введения в действие требований Tier 2 предельно допустимые значения идентичны для бензиновых и дизельных двигателей.

Классы автомобилей

С переходом на стандарт Tier 2 был введен дополнительный класс автомобилей - MDPV (среднетоннажный легковой автомобиль). Таким образом, все автомобили с разрешенной полной массой до 10 000 фунтов и вместимостью до 12 человек проходят испытания на стенде с беговыми барабанами.

Малотоннажные грузовые автомобили подразделяются на две группы: LLDT (малотоннажный грузовой автомобиль малой грузоподъемности) с разрешенной полной массой до 6000 фунтов и более тяжелая категория HLDT (тяжелый грузовой автомобиль малой грузоподъемности) с разрешенной полной массой до 8500 фунтов.

Рис. 4. Предельные концентрации токсичных веществ, предусматриваемые стандартом EPA (Tier 2), по сравнению со стандартом CARB



С 2007 года также будет возможна сертификация на стенде с беговыми барабанами автомобилей с разрешенной полной массой до 14 000 фунтов.

Категории токсичности отработавших газов

Для Tier 2 предельные значения токсичности разделены на 10 (для легковых автомобилей и LLDT) и 11 (для HLDT и MDPV) стандартов токсичности («корзин»). Для легковых автомобилей и LLDT с 2007 года не применяются корзины 9 и 10, а для HLDT и MDPV с 2009 года не применяются корзины 9, 10 и 11.

Переход к Tier 2 повлек за собой следующие изменения:

- ввод средних значений для концентрации NO_x;
- формальдегид (HCHO) отнесен к отдельной категории загрязняющих веществ;
- легковые автомобили и автомобили категории LLDT в отношении пределов FTP в максимально возможной степени рассматриваются идентично;
- в зависимости от стандарта токсичности («корзины») «полный период нормальной эксплуатации» увеличен до 120 000 миль или 150 000 миль пробега.

Вступление в силу

Не менее 25% всех новых легковых автомобилей и автомобилей категории LLDT должны отвечать требованиям Tier 2, введенных в действие в 2004 году. Правила поэтапного ввода в действие предусматривают, что 25% автомобилей должны в каждом последующем году отвечать требованиям Tier 2. С 2007 года требованиям Tier 2 должны отвечать все автомобили. Период поэтапного ввода в действие для автомобилей категорий HLDT и MDPV истек в 2009 году.

Среднее значение

В соответствии со стандартами EPA в качестве критерия для определения средних значений используется количество содержания в отработавших газах оксидов азота NO_x. Следует отметить, что положения CARB разработаны на основе выбросов NMOG (для стандарта LEV II) или NMOG + NO_x (для планируемого к вводу стандарта LEV III).

Мониторинг в реальных условиях дорожного движения

Внеплановый контроль

Стандарт EPA, так же как стандарт CARB предусматривает контроль токсичности отработавших газов в соответствии с циклами испытаний FTP 75, которые должны быть выполнены на эксплуатируемых автомобилях на выборочной основе. Испытания проводятся на автомобилях с малым пробегом (10 000 миль, время эксплуатации – приблизительно один год) автомобилях со средним пробегом (50 000 миль, однако, как минимум один автомобиль из группы, в зависимости от категории токсичности, должен иметь пробег 90 000 или 105 000 миль; время эксплуатации автомобилей – приблизительно четыре года). Количество испытуемых автомобилей зависит от общего количества проданных. Для автомобилей с бензиновыми двигателями, как минимум один автомобиль из группы должен быть испытан на выделение паров топлива.

Мониторинг, осуществляемый производителями

Для автомобилей, выпущенных после 1972 модельного года, производитель обязан выпускать официальный отчет, включающий данные по выходу из строя компонентов систем снижения токсичности отработавших газов, если, как минимум, 25 идентичных компонентов для данного модельного года имели дефекты. Период обязательной отчетности заканчивается через пять лет после окончания модельного года. Отчет должен включать описание дефектов тех или иных компонентов, описание влияния дефектов на уровень токсичности выбросов и описание корректирующих действий, выполненных производителем. Агенство охраны окружающей среды использует эту информацию для принятия решения о необходимости отзыва той или иной партии автомобилей того или иного производителя.

Расход топлива

Законодательство США предъявляет к производителям автомобилей требования, касающиеся среднего расхода топлива для их парка автомобилей или расстояния в милях, которое автомобиль может пройти на одном галлоне топлива (Федеральный закон, соответствующим уполномоченным органом является Национальная администрация по безопасности дорожного движения, NHTSA). Здесь расход топлива измеряется не в метрических единицах «количества топлива на единицу расстояния» а в «милях на галлон топлива (мили/галлон)». До 2010 года предписанное значение CAFE (средний общий расход топлива) для легковых автомобилей составляло 27,5 миль/галлон. Это соответствует расходу топлива 8,55 л бензина на 100 км.

До 2004 года значение для малотоннажных грузовых автомобилей составляло 20,7 миль/галлон или 11,36 л бензина на 100 км. В течение периода с 2005 по 2010 годы это значение возросло до 23,5 миль/галлон.

Для 2011 модельного года система CAFE реструктуризируется для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей (среди прочего пересмотрены определения легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей) и для них установлены амбициозные целевые значения 39,2 и 24,1 миль/галлон, соответственно.

Для модельных годов с 2012 по 2016, параллельно с требованиями CAFE, будут введены ограничения содержания парниковых газов с целевыми значениями 34,1 миль/галлон (CAFE) или с эквивалентом 250 г CO_2 на милю пробега (EPA) для автомобилей 2016 модельного года.

В конце каждого года для каждого производителя вычисляется средний расход топлива для всех проданных автомобилей. За каждые 0,1 мили/галлон меньше целевого значения на один автомобиль производитель должен будет уплатить штраф в размере 5,50 долл. Покупатели также будут обязаны платить налог на автомобили с особенно высоким расходом топлива. Здесь пороговое значение составляет 22,5 мили/галлон (10,45 л на 100 км). Эти штрафные санкции направлены на стимулирование разработки автомобилей со все более низким расходом топлива.

Испытательный цикл FTP 75 и дорожные испытания имеют целью определение расхода топлива (CAFE) (см. раздел «Испытательные циклы для США»).

Покупатель получает информацию о расходе топлива из ярлыка расхода. Начиная с 2008 модельного года введены циклы определения расхода топлива методом «5 циклов», имеющие целью лучше отразить реальные условия движения автомобиля. Они включают также регламенты испытаний SFTP и FTP при температуре наружного воздуха 7 °C и движение с резкими ускорениями, высокими скоростями, а также при работающем кондиционере воздуха.

Для большегрузных грузовых автомобилей нормы расхода топлива в настоящее время действуют только в Китае и Японии. Предельные значения расхода топлива и соответствующие испытательные циклы в настоящее время разрабатываются для Европы и США.

Стандарт ЕС (легковые и малотоннажные грузовые автомобили)

Директивы по нормам контроля токсичности отработавших газов в Европе были предложены Комиссией ЕС и ратифицированы советом министров по охране окружающей среды и Европейским парламентом. Основой норм контроля токсичности отработавших газов для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей является Директива 70/2201/ЕЭС от 1970 года. В этой директиве впервые были определены предельные значения содержания токсичных веществ в выбросах автомобилей. С тех пор положения директивы неоднократно изменялись.

Предельные концентрации токсичных веществ в выбросах для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей – LCV (грузовых автомобилей малой грузоподъемности – LDT) также указаны в стандартах токсичности Евро-1 (от 07/1992), Евро-2 (01/1996), Евро-3 (01/ 2000), Евро-4 (01/2005), Евро-5 (09/2009) и Евро-6 (09/2014).

Вместо «поэтапного ввода в действие» в течение нескольких лет, как в США, новый стандарт ограничения токсичности вводится в действие в два этапа. На первом этапе определенным предельным значениям концентраций заново должны соответствовать вновь сертифицируемые модели автомобилей. На втором этапе, один год спустя, новым предельным значениям должен соответствовать каждый вновь регистрируемый автомобиль (т.е. все типы). Законодатель может проверить серийно выпускаемые автомобили на предмет соответствия требованиям в отношении предельно допустимых концентраций токсичных веществ в выбросах (COP, соответствие серийно выпускаемой продукции и проверка соответствия в реальных условиях эксплуатации).

Директивы ЕС предусматривают возможность налоговых льгот для автомобилей, отвечающих требованиям стандартов токсичности, до их фактического вступления в силу. В зависимости от стандарта токсичности отработавших газов в Германии, например, действует несколько различных ставок налога.

Классы автомобилей

До истечения срока действия норм Евро-4 автомобили с разрешенной полной массой менее 3,5 т сертифицируются на стендах с беговыми барабанами; различаются легковые автомобили (вместимостью до девяти человек) и малотоннаж-

ные грузовые автомобили (LCV), предназначенные для перевозки грузов. Для LCV, в зависимости от эталонной массы автомобиля (собственная масса + 100 кг) предусматриваются три класса токсичности отработавших газов. Сертификация двигателя предусматривается для автобусов (вместимостью более девяти человек) и автомобилей с разрешенной полной массой более 3,5 т.

Двигатели для автомобилей категории LCV также могут быть сертифицированы на стендах для испытаний двигателей. После вступления в силу норм Евро-5 и Евро-6 процедура сертификации будет различна в зависимости от эталонной массы автомобиля (собственная масса + 100 кг). Автомобили с эталонной массой до 2,61 т. будут сертифицироваться на стенде с беговыми барабанами. Автомобили с эталонной массой свыше 2,61 т будут сертифицироваться на стенде для испытания двигателей. Будут также возможны различные гибкие варианты.

Нормы токсичности отработавших газов

Стандарты ЕС предусматривают пределы содержания оксида углерода (CO), углеводородов (HC), оксидов азота (NO_x), и твердых частиц (PM) (для бензиновых двигателей, начиная с Евро-5). Для норм Евро-1 и Евро-2 пределы содержания углеводородов и оксидов азота указываются одним значением (HC + NO_x). Начиная с Евро-3, в дополнение к этому общему значению, для автомобилей с дизельными двигателями вводится отдельный предел содержания NO_x. Для автомобилей с бензиновыми двигателями вместо суммарного значения вводятся отдельные пределы HC и NO_x. Нормы Евро-5 введены в действие в два этапа, как Евро-5a и Евро-5b. С вступлением в силу Евро-5a для бензиновых двигателей начал действовать предел содержания неметановых углеводородов (NMHC), а с вступлением в силу Евро-5b (с сентября 2011 года) – предел содержания твердых частиц для дизельных двигателей, который, при необходимости, начиная с Евро-6, будет также применим к автомобилям с бензиновыми двигателями (см. рис. 5 и 6). Предельные значения определяются, исходя из пройденного расстояния и указываются в граммах на километр (г/км). Начиная с Евро-3. количество выбросов измеряется на стенде с беговыми барабанами в соответствии с процедурой MNEDC (модифицированный европейский цикл испытаний).

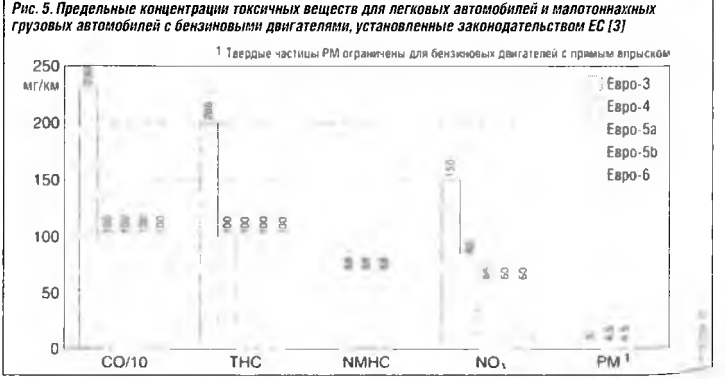
Для автомобилей с дизельными и бензиновыми двигателями предельные значения различны, но со вступлением в силу норм Евро-6 они будут сближены.

Пределы для автомобилей LCV класса 1 такие же, как для легковых автомобилей. Легковые автомобили с разрешенной полной массой свыше 2,5 т в нормах Евро-3 и Евро-4 рассматриваются как LCV и, следовательно, аналогично классифицируются в соответствии с тремя классами LCV. Эта классификация потеряла силу со вступлением в силу норм Евро-5.

Типовые испытания на соответствие техническим условиям

Хотя типовые испытания на соответствие техническим условиям в основном соответствуют циклам, принятым в США, имеют место сле-

Рис. 5. Предельные концентрации токсичных веществ для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей с бензиновыми двигателями, установленные законодательством ЕС [3]



дующие различия: для автомобилей с дизельными двигателями в дополнение к измерениям содержания HC, CO и NO_x выполняются измерения содержания твердых частиц и дымности отработавших газов.

Испытуемые автомобили перед началом испытаний должны иметь величину пробега 3000 километров. Предельные значения при испытаниях Типа I представляют собой пределы для «полного периода нормальной эксплуатации», т.е. они должны соблюдаться даже по достижении величины пробега, указанной в требованиях к долговечности. В целях учета старения компонентов на протяжении пробега до указанного предела долговечности к значениям, измеренным в ходе типовых испытаний на соответствие техническим условиям, применяются коэффициенты ухудшения состояния. Эти коэффициенты определены в стандартах для каждого загрязняющего вещества; производителям также разрешается представлять документацию, подтверждающую низшие значения коэффициентов, полученные в результате указанных испытаний на долговечность (испытания Типа V) продолжительностью свыше 80 000 км. Начиная с Евро-5, продолжительность испытаний на долговечность увеличена до 160 000 км, причем возможны различные альтернативные циклы испытаний.

Типовые испытания

Предусмотрены шесть различных видов типовых испытаний на соответствие техническим условиям. Испытания Типов I, IV, V и VI предусмотрены для автомобилей с бензиновыми двигателями; для автомобилей с дизельными двигателями предусмотрены только испытания Типов I и V.

Испытания Типа I представляют собой проверку токсичности отработавших газов после пуска холодного двигателя в соответствии с ездовыми циклами MNEDC. Кроме того, для автомобилей с дизельными двигателями измеряется дымность отработавших газов.

В ходе испытаний Типа IV измеряется количество выбросов припаркованных автомобилей в виде паров топлива. В основном это относится к испарению топлива из компонентов топливной системы (топливный бак, топливопроводы и т.д.).

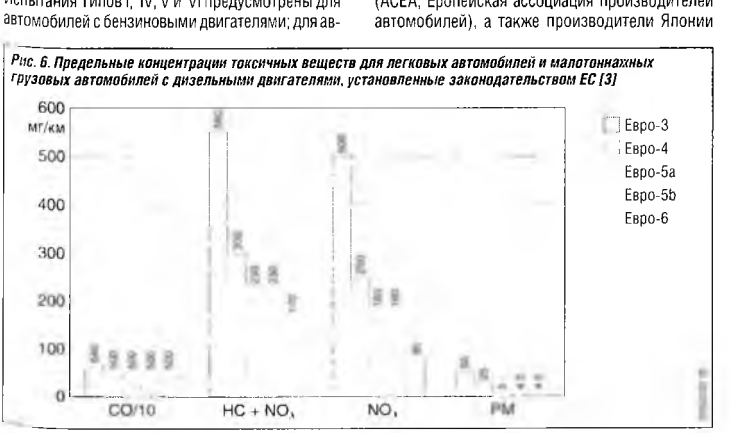
Испытания Типа VI включают измерение содержания в отработавших газах углеводородов и оксида углерода сразу же после пуска холодного двигателя при температуре наружного воздуха –7 °C. В ходе этих испытаний выполняется только первая часть (городской ездовой цикл) циклов MNEDC. Эти испытания обязательны с 2002 года.

В ходе испытаний Типа V выполняется оценка долговечности компонентов систем снижения токсичности отработавших газов. В дополнение к предписанному циклу испытаний на долговечность, начиная с Евро-5 возможно использование альтернативных циклов испытаний (например, оценка долговечности на испытательном стенде).

Выбросы CO_2

До 2011 года стандарта, устанавливающего предельное содержание CO_2 в отработавших газах не существовало, хотя европейские производители (ACEA, Европейская ассоциация производителей автомобилей), а также производители Японии

Рис. 6. Предельные концентрации токсичных веществ для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей с дизельными двигателями, установленные законодательством ЕС [3]



(JAMA) и Корее (KAMA) устанавливали определенные пределы. Целевые значения в 2008 году (в 2009 году в нормах KAMA) для выбросов CO_2 составляли максимум 140 г/км для легковых автомобилей, что эквивалентно расходу топлива 5,8 л/100 км для бензиновых двигателей или 5,3 л/100 км для дизельных двигателей. Поскольку производители не смогли достичь этих целевых значений, законодательством было установлено целевое значение для легковых автомобилей. В течение периода ввода в действие с 2012 по 2015 годы должно быть достигнуто среднее значение 130 г/км (что эквивалентно расходу топлива 5,3 л/100 км для автомобилей с бензиновыми двигателями или 4,9 л/100 км для автомобилей с дизельными двигателями). Аналогичные нормы планируются для малотоннажных грузовых автомобилей. Дальнейшее снижение предельно допустимых значений планируется на 2020 год. Согласно правилам CAFE в США, если производитель не достигает целевых значений, он платит штраф.

Мониторинг в реальных условиях дорожного движения

Стандарт ЕС также требует проведения испытаний для подтверждения соответствия на бывших в эксплуатации автомобилях, как части цикла испытаний Типа I. Минимальное количество автомобилей испытуемой модели равно трем, в то время как максимальное количество варьируется в зависимости от процедуры испытаний.

Испытуемые автомобили должны отвечать следующим критериям:

- пробег должен составлять от 15 000 до 80 000 км, а время эксплуатации автомобиля – от 6 месяцев до 5 лет (для Евро-3);
- регулярные технические осмотры производились с интервалами, предписанными производителем;
- автомобили не должны демонстрировать признаков ненадлежащей эксплуатации (например, вмешательств, капитального ремонта и т.д.).

Если количество вредных выбросов существенно превышает предельные значения, установленные стандартами, должна быть определена причина высокого содержания загрязняющих веществ. Если несколько, случайным образом отобранных автомобилей демонстрируют высокие значения содержания загрязняющих веществ по одной и той же причине, результаты испытаний признаются отрицательными. Если причины различны, регламент испытаний может быть расширен, при условии, что не будет превышено максимальное количество испытуемых автомобилей.

Если аттестационная организация определит, что данная модель автомобиля не отвечает критериям, производитель должен разработать программу действий по устранению дефекта. Программа действий должна распространяться на все автомобили с одинаковым дефектом. При необходимости должна быть запущена программа отзыва.

Периодический контроль токсичности отработавших газов

В Германии проверка токсичности отработавших газов всех легковых автомобилей, малотоннажных грузовых автомобилей и фургонов должна производиться через три года после первоначальной регистрации, а затем через каждые два года. Для автомобилей с бензиновыми двигателями основное внимание уделяется содержанию CO и работе системы регулирования, с обратной связью содержания кислорода λ, в то время как для автомобилей с дизельными двигателями основным критерием является дымность выхлопа. Для автомобилей, оборудованных бортовой системой диагностики (OBD), учитываются данные, извлеченные из системы бортовой диагностики.

Аналогичный контроль предусмотрен и в других странах; в Европе, например: в Австрии, Франции, Испании и Швейцарии, а также во многих штатах США в форме «технического осмотра и технического обслуживания».

Стандарт Японии (легковые автомобили/малотоннажные грузовые автомобили)

В Японии требования к предельно допустимому содержанию токсичных веществ в отработавших газах также постепенно становятся все более строгими. С сентября 2007 года предельные значения подверглись дальнейшему ужесточению в рамках «Новых долгосрочных стандартов» (см. табл. 1).

Для автомобилей с дизельными двигателями с сентября 2010 предельные значения были ужесточены в рамках «новых долгосрочных норм» (см. табл. 2). Для автомобилей с бензиновыми двигателями предыдущие искусственные испытательные циклы проходили в два этапа (в 2008 и 2011 году) были заменены более реалистичным циклом JC08.

Автомобили с разрешенной полной массой до 3,5 т разделяются на три следующих класса: легковые автомобили (до десяти мест), LDV (автомобили малой грузоподъемности) грузоподъемностью до 1,7 т и MDV (автомобили средней грузоподъемности) полной массой до 3,5 т. Для

автомобилей класса MDV предусмотрены более высокие пределы содержания CO и NO_x (для автомобилей с бензиновыми двигателями), чем для автомобилей двух других классов. Для автомобилей с дизельными двигателями категории автомобилей различаются по предельному содержанию NO_x и твердых частиц.

Нормы токсичности отработавших газов

Японский стандарт определяет предельные содержания оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x), неметановых углеводородов (NMHC) и твердых частиц (для автомобилей с дизельными двигателями, а с 2009 года также для автомобилей с бензиновыми двигателями с прямым впрыском топлива и системой снижения содержания NO_x) и дымность выхлопа (только для автомобилей с дизельными двигателями).

Содержание вредных выбросов определяется в ходе 11-режимных и 10 · 15-режимных испытательных циклов (см. раздел «Японские испытательные циклы»). Эти процедуры также учитывают количество выбросов сразу после пуска холодного двигателя. В 2008 году был введен новый цикл испытаний (JC08). Он предназначен для замены 11-режимного, а с 2011 года также 10 · 15-режимного цикла, и для испытаний в режиме пуска как холодного, так и горячего двигателя будет использоваться один и тот же цикл JC08.

Долговечность

Для автомобилей с дизельными двигателями производители должны продемонстрировать долговечность 45 000 км (нормы долгосрочности) или 80 000 км (новые нормы долгосрочности). Для всех автомобилей с бензиновыми двигателями установлено значение 80 000 км.

Таблица 1. Предельные концентрации токсичных веществ, установленные японским законодательством для легковых автомобилей (новые долгосрочные стандарты)

	CO, г/км	NO_x, г/км	NMHC, г/км	Твердые частицы, г/км
Бензиновые двигатели	1.15	0.05	0.05	–
Дизельные двигатели	0.63	0.14	0.024	0.013

Таблица 2. Предельные концентрации токсичных веществ, установленные японским законодательством для легковых автомобилей (будущие долгосрочные стандарты, планируемые целевые значения)

	CO, г/км	NO_x, г/км	NMHC, г/км	Твердые частицы, г/км
Бензиновые двигатели	–	–	–	–
Дизельные двигатели	0.63	0,08	0,024	0,005

Расход топлива

В Японии средние значения расхода топлива для парков автомобилей различных производителей, действительные с 2010 года и планируемые с 2015 года, установлены в соответствии с классами массы автомобилей. Законодательство предусматривает налоговые льготы для производителей автомобилей со сниженным расходом топлива (программа экологических налоговых льгот) – две ступени налоговых льгот, соответственно 15 % и 25 %.

Стандарт США (большегрузные грузовые автомобили)

Большегрузные грузовые автомобили определяются в стандарте EPA, как автомобили полной массой более 8 500 или 10 000 фунтов (соответственно 3,9 и 4,6 т), в зависимости от типа автомобиля.

В Калифорнии все автомобили полной массой более 14 000 фунтов (6,4 т) классифицируются как большегрузные грузовые автомобили. В значительной степени стандарты Калифорнии идентичны определенным частям стандарта EPA. Однако, предусмотрена дополнительная программа для городских автобусов.

Нормы токсичности отработавших газов

Стандарты США определяют предельное содержание в отработавших газах углеводородов (HC), оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x), твердых частиц (PM) неметановых углеводородов (NMHC), а также дымности выхлопа.

Предельно допустимые значения соотнесены с мощностью двигателя и указаны в г/кВт (см. рис. 7). Количество выбросов измеряется на стенде для испытаний двигателей во время цикла динамических испытаний с выполнением последовательности холодного пуска двигателя (HDDTC, переходный цикл испытаний тяжелых автомобилей с дизельными двигателями), дымность выхлопа измеряется в соответствии с федеральной процедурой проверки дымности (FST).

Начиная с 2004 модельного года, действуют новые нормы со значительно сниженными значениями предельно допустимого содержания NO_x. Неметановые углеводороды и оксиды азота объединены в одну группу (NMHC + NO_x). Предельные содержания CO и твердых частиц остаются на том же уровне, что и для 1998 модельного года.

Еще одно значительное ограничение токсичности отработавших газов вступило в силу с 2007 модельного года. Предельные содержания NO_x и твердых частиц теперь в 10 раз ниже предыдущих уровней. Эти уровни вероятно недостижимы без применения систем снижения токсичности выбросов (например, каталитических нейтрализаторов DeNOx или сажевых фильтров).

Поэтапный ввод в действие новых норм для NO_x и NMHC осуществлял в течение периода между 2007 и 2010 модельными годами.

В целях облегчения выполнения строгих требований к предельному содержанию твердых частиц максимальное допустимое содержание серы в дизельном топливе с середины 2006 года снижено до 15 частей/млн.

Для большегрузных грузовых автомобилей, в отличие от легковых и малотоннажных грузовых автомобилей, средних предельных значений содержания токсичных веществ и значений расхода топлива для парка автомобилей не установлено.

Соглашение между сторонами

В 1998 между Агентством по защите окружающей среды, Калифорнийским советом по воздушным ресурсам и рядом производителей двигателей было достигнуто соглашение. Оно предусматривает санкции в отношении производителей, выполняющих незаконные модификации двигателей с целью снижения расхода топлива, результатом которых становится увеличение содержания NO_x. «Соглашение» предусматривает, что применимые предельные концентрации токсичных веществ должны также быть ниже значений, предусмотренных процедурой Европейских 13-ступенчатых испытаний в стационарном режиме в дополнение к циклу динамических испытаний. Кроме того, значения содержания токсичных веществ в отработавших газах не должно превышать предельных значений для 2004 модельного года более чем на 25%, независимо от режима движения в пределах указанного диапазона частоты вращения коленчатого вала/крутящего момента (зона «непревышения»).

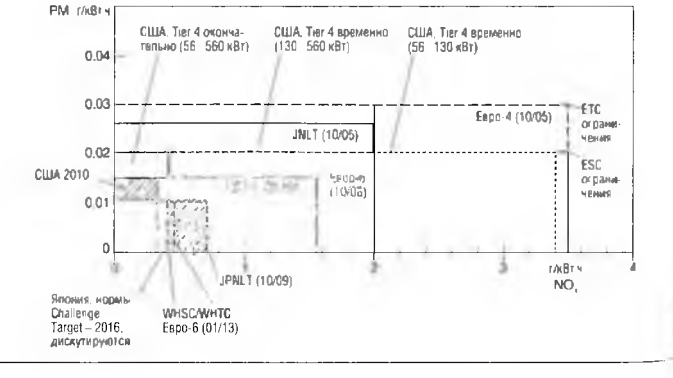
Эти дополнительные испытания являются обязательными для всех грузовых автомобилей с дизельными двигателями, начиная с 2007 модельного года. Однако количество выбросов в зоне «непревышения» не должно превышать предельно допустимых значений более чем на 50%.

Долговечность

Соответствие требованиям к предельному содержанию токсичных веществ в отработавших газах должно быть продемонстрировано на протяжении определенной величины пробега или определенного периода времени. При этом различаются три класса автомобилей в зависимости от их массы, со все более строгими требованиями к долговечности для каждого следующего класса:

- малотоннажные грузовые автомобили полной массой от 8500 фунтов (EPA) или 14 000 фунтов (CARB) до 19 500 фунтов: 10 лет или 110 000 миль;
- среднетоннажные грузовые автомобили полной массой от 19 500 фунтов до 33 000 фунтов: 10 лет или 185 000 миль;

Рис. 7. Сравнение предельно допустимого содержания NO, и твердых частиц для грузовых автомобилей с дизельными двигателями: ЕС, США, Япония [4]



– большегрузные грузовые автомобили полной массой свыше 33 000 фунтов: 10 лет или 290 000 миль.

Требования к расходу топлива

В США нормы расхода топлива для большегрузных грузовых автомобилей в настоящее время находятся на стадии разработки, и их вступление в силу планируется на 2017 год.

Стандарт ЕС (большегрузные грузовые автомобили)

В Европе все автомобили с разрешенной полной массой свыше 3,5 т или способные перевозить более девяти человек классифицируются как большегрузные грузовые автомобили. Предельно допустимые концентрации токсичных веществ в отработавших газах были указаны в Директиве 88/77/ЕЭС [2]. Со времени выхода данной директивы эти значения постоянно обновлялись.

Так же как для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей, новые предельные значения для большегрузных грузовых автомобилей вводятся в действие в два этапа. Новые конструкции двигателей должны отвечать новым требованиям к предельному содержанию токсичных веществ на стадии типовых испытаний на соответствие техническим условиям

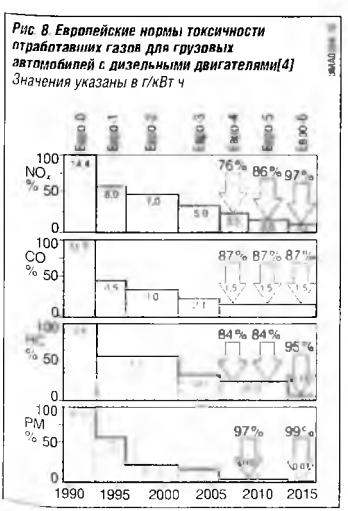


***Рис. 8.** Европейские нормы токсичности отработавших газов для грузовых автомобилей с дизельными двигателями[4]*
Значения указаны в г/кВт·ч

Через год соответствие новым требованиям станет обязательным условием для регистрации всех новых автомобилей. Законодатель может проверить соответствие серийно выпускаемой продукции (COP), случайным образом взяв несколько двигателей из серийного производства и подвергнув их испытаниям на предмет соответствия новым предельным значениям.

Нормы токсичности отработавших газов

Для дизельных двигателей грузовых автомобилей стандарты Евро определяют предельные содержания углеводородов (HC и NMHC), оксида углерода(CO), оксидов азота (NO_x), твердых частиц и показатели дымности выхлопа. Предельно допустимые значения соотнесены с мощностью двигателя и указаны в г/кВт·ч (см. рис. 8).

Нормы токсичности Евро-3 применяются для всех типовых испытаний на соответствие техническим условиям новых двигателей, выпущенных с октября 2000 года, а также ко всем серийно выпускаемым автомобилям с октября 2001 года. Содержание выбросов измеряется во время 13-ступенчатого Европейского цикла испытаний в установившихся режимах (ESC), а показатели дымности выхлопа – в соответствии с процедурой дополнительных испытаний ELR (Европейский цикл испытаний последовательных ступеней нагрузки при постоянной частоте вращения). Дизельные двигатели, оборудованные системами снижения токсичности отработавших газов (например, каталитическими нейтрализаторами DeNOx или сажевыми фильтрами), также должны быть испытаны в соответствии с процедурой Европейского цикла испытаний в переходных режимах (ETC). Европейские испытательные циклы проводятся при нормальной рабочей температуре двигателя.

Для двигателей с малым рабочим объемом, т.е. с объемом менее 0,75 л на один цилиндр и номинальной частотой вращения коленчатого вала свыше 3000 мин$^{-1}$, допустимое содержание твердых частиц несколько выше, чем для двигателей с большим рабочим объемом. Для цикла испытаний ETC установлены отдельные значения предельно допустимого содержания токсичных веществ, например, допустимое содержание твердых частиц приблизительно на 50 % выше, чем указано для цикла ESC, поскольку пиковых выбросов сажи можно ожидать именно в переходных, динамических режимах.

В октябре 2005 года вступили в силу нормы токсичности Евро-4, сначала для типовых испытаний на соответствие техническим условиям, а год спустя для серийного производства. Все предельные концентрации токсичных веществ значительно

ниже, чем предусмотрено нормами Евро-3, однако наиболее значительным было ужесточение требований к содержанию твердых частиц (допустимый предел снижен приблизительно на 80 %). Кроме того, вступление в силу норм Евро-4 повлекло за собой следующие изменения:
- динамические испытания (ETC) в дополнение к циклам ESC и ELR являются обязательными для всех дизельных двигателей;
- функционирование компонентов системы снижения токсичности отработавших газов должно документально отражаться на протяжении всего срока службы автомобиля.

Нормы токсичности Евро-5 были введены в действие в октябре 2008 года для всех новых двигателей и год спустя для всех новых серийно произведенных автомобилей. По сравнению с нормами Евро-4 были ужесточены требования только к предельному содержанию NO_x.

В январе 2013 года вступят в силу нормы Евро-6 для новых типов двигателей (1 год спустя для всех вновь произведенных двигателей). По сравнению с нормами Евро-5, предельное содержание оксидов азота будет снова снижено на 80 %, а содержание твердых частиц – более чем на 60 % (относительно предела ETC для Евро-5). В соответствии с нормами Евро-6 будут введены новые, согласованные процедуры испытаний. Здесь также будут предусмотрены испытания в стационарном режиме (WHSC, всемирный согласованный цикл испытаний в установившихся режимах и динамические испытания (WHTC, всемирный согласованный динамический цикл). В отличие от норм Евро-5, в Евро-6 не будут отдельно указаны значения предельного содержания твердых частиц для испытаний в переходных (динамических) режимах; эти предельные значения будут идентичны указанным для испытаний в установившихся режимах.

Долговечность

Соответствие требованиям к предельному содержанию токсичных веществ в отработавших газах должно быть продемонстрировано на протяжении определенной величины пробега или определенного периода времени. При этом различаются три класса автомобилей в зависимости от их массы, со все более строгими требованиями к долговечности для каждого следующего класса:
- малотоннажные грузовые автомобили с разрешенной полной массой до 3,5 т: 6 лет или 100 000 км (Евро-4 и Евро-5) или 160 000 км (Евро-6);
- грузовые автомобили с разрешенной полной массой до 16 т: 6 лет или 200 000 км (Евро-4 и Евро-5) или 300 000 км (Евро-6);
- большегрузные грузовые автомобили с разрешенной полной массой более 16 т: 7 лет или 500 000 км (Евро-4 и Евро-5) или 700 000 км (Евро-6).

Расход топлива

Нормы предельного содержания CO_2 в настоящее время находятся на стадии разработки; измерения предполагается производить во время движения при помощи транспортируемой измерительной аппаратуры, установленной на автомобиле.

Автомобили с очень низким количеством выбросов

Директивы ЕС предусматривают налоговые льготы для производителей, автомобили которых уже в настоящее время отвечают требованиям, указанным для того или иного этапа ввода в действие новых стандартов ЕС и для автомобилей категории EEV (высокоэкологичные автомобили). Для категории EEV для циклов испытаний ESC, ETC и ELR указаны произвольные предельные значения содержания токсичных веществ в отработавших газах. Значения предельного содержания NO_x и твердых частиц эквиваленты значениям, указываемым нормами Евро-5 для цикла испытаний ESC. Нормы содержания HC, NMHC, CO и дымности выхлопа более строгие, чем предусмотрено нормами Евро-5.

Стандарт Японии (большегрузные грузовые автомобили)

В Японии как большегрузные грузовые автомобили классифицируются автомобили с разрешенной полной массой свыше 3,5 т или способные перевозить более девяти человек.

Нормы токсичности отработавших газов

В октябре 2005 года вступили в силу «Новые долгосрочные нормы». Они предусматривают предельные значения содержания HC, NO_x, CO, твердых частиц и дымности выхлопа. Измерения содержания токсичных веществ выполняются в соответствии с вновь введенным циклом испытаний JE05 (испытания на горячем двигателе), а дымности выхлопа – в соответствии с «Японским циклом проверки дымности выхлопа».

С сентября 2009 года действуют «Последующие долгосрочные нормы». По сравнению с нормами, введенными в действие в 2005 году,

предельные значения содержания твердых частиц и NO_x снижены почти на две трети.

На 2016 год планируется ввод в действие норм «Challenge Target», предусматривающих дальнейшее снижение предельно допустимого содержания NO_x еще на две трети.

Долговечность

Соответствие требованиям к предельному содержанию токсичных веществ в отработавших газах должно быть продемонстрировано на протяжении определенной величины пробега или определенного периода времени. При этом различаются три класса автомобилей в зависимости от их массы, со все более строгими требованиями к долговечности для каждого следующего класса:

- грузовые автомобили разрешенной полной массой до 8 т: 250 000 км;
- грузовые автомобили с разрешенной полной массой до 12 т: 450 000 км;
- большегрузные грузовые автомобили разрешенной полной массой более 12 т: 650 000 км.

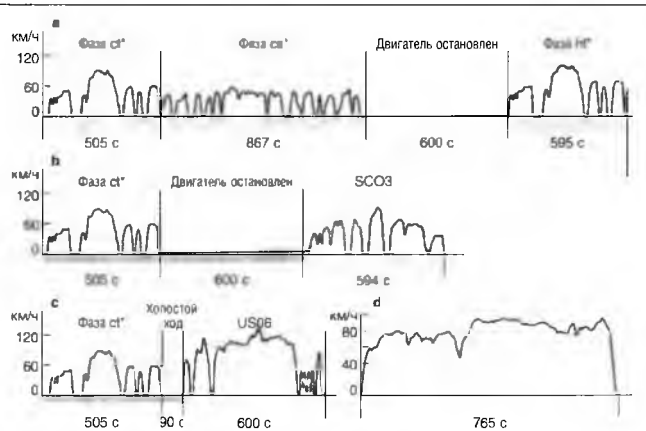
Требования к расходу топлива

Предельные значения расхода топлива установлены для грузовых автомобилей и автобусов разрешенной полной массой свыше 3,5 т. Предусмотрены два цикла движения (городской и загородный).

Расход топлива определяется на стенде для испытания двигателей. Поскольку расход топлива сильно зависит от индивидуальных характеристик

Рис. 9. Испытательные ездовые циклы для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей, принятые в США

	a	b	c	d
Цикл испытаний	FTP 75	SC03	US06	Цикл движения по автомагистрали
Пробег:	17,87 км	5,76 км	12,87 км	16,44 км
Продолжительность цикла:	1877 с + пауза 600 с	594 с	600 с	765 с
Средняя скорость	34,1 км/ч	34,9 км/ч	77,3 км/ч	77,4 км/ч
Максимальная скорость:	91,2 км/ч	88,2 км/ч	129,2 км/ч	96,4 км/ч



** ct-фаза холодного состояния двигателя, cs Фаза установившегося состояния; ht-фаза горячего состояния двигателя.*

Фазы, в течение которых берутся пробы отработавших газов

Настройка требуемых режимов работы (возможны другие циклы движения)

двигателя и автомобиля в целом (например, компоновки кинематической цепи привода, сопротивления качению, массы автомобиля), вычисления выполняются с использованием программы преобразования. Требования для грузовых автомобилей с разрешенной полной массой менее 10 т – 6,5 км/л (или 7,4 км/л), для полуприцепов с разрешенной полной массой менее 20 т – 2,7 км/л (2,9 км/л) и для автобусов с разрешенной полной массой менее 14 т – 4,5 км/л (5,0 км/л). Значения, указанные в скобках, действительны с 2015 года.

Региональные программы

В дополнение к общенациональным нормам, применяемым к новым автомобилям, существуют также региональные программы, целью которых является замена или модернизация старых автомобилей с дизельными двигателями для снижения токсичности отработавших газов.

В 2003 году вступил в силу «Закон о содержании NO_x», действующий в пределах городской территории Токио и распространяющийся на автомобили с разрешенной полной массой свыше 3500 кг. Закон указывает, что по истечении от 8 до 12 лет после первой регистрации автомобиля содержание NO_x и твердых частиц должно отвечать требованиям соответствующих предыдущих норм (например, нормы 1998 года, начиная с 2003 года). такой же принцип действует в отношении выбросов твердых частиц. Здесь срок составляет семь лет с момента первой регистрации автомобиля.

Испытательные циклы, принятые в США (легковые автомобили и малотоннажные грузовые автомобили)

(FTP 75)

Цикл испытаний FTP 75 (федеральная процедура испытаний, рис. 9, а) состоит из скоростных циклов, фактически зарегистрированных в пригородном движении Лос-Анджелеса. Кроме США эти испытания приняты также в некоторых странах Южной Америки и Кореи.

Настройка режимов работы

Автомобиль выдерживается при температуре окружающего воздуха от 20 до 30 °С в течение от 6 до 36 часов.

Отбор отработавших газов

Запускается двигатель, и автомобиль выполняет определенные в цикле испытаний скоростные циклы движения. В течение отдельных фаз испытаний выбросы отбираются в отдельные мешки.

Фаза ct (переходная, холодный двигатель): разбавленные отработавшие газы собираются в емкость во время холодной переходной фазы ct (в течение периода 0–505 с).

Фаза cs (установившаяся, холодный двигатель): начало фазы cs – через 506 с после пуска двигателя. Отработавшие газы собираются без прерывания цикла движения. По окончании фазы cs, через 1372 с после пуска двигатель выключается на 600 с (выдержка в горячем состоянии).

Фаза ht (переходная, горячий двигатель): двигатель снова запускается для выполнения испытаний в горячем состоянии. Скоростной цикл идентичен циклу фазы ct.

Фаза hs (горячий, стабилизированный двигатель):
фаза hs выполняется для гибридных автомобилей. Для других автомобилей предполагается, что значения содержания токсичных веществ в отработавших газах идентично фазе cs.

Оценка

Анализ состава отработавших газов, отобранных в течение двух первых фаз, выполняется в течение паузы перед испытаниями в горячем состоянии. Это обусловлено тем, что пробы отработавших газов не могут оставаться в мешках более 20 минут.

Пробы отработавших газов, содержащиеся в третьем мешке, анализируются по завершении цикла движения. Общий результат включает сумму количеств выбросов в течение трех фаз с различными весовыми коэффициентами. Массы загрязняющих веществ, собранных в течение фаз ct и cs, суммируются и соотносятся с общим расстоянием, пройденным в течение этих двух фаз. Результат умножается на весовой коэффициент 0,43.

Такие же операции выполняются в отношении общей массы загрязняющих веществ, собранных в течение фаз ht и cs. Общая масса загрязняющих веществ, соотнесенная к общему пройденному в течение этих двух фаз расстоянию, умножается на весовой коэффициент 0,57. Общий результат испытаний для отдельных составляющих (HC, CO и NO_x) получается путем суммирования двух предыдущих результатов.

Количество выбросов указывается в граммах на милю пробега.

Регламенты SFTP

Циклы испытаний SFTP (дополнительные федеральные циклы испытаний) были введены в действие с 2001 по 2004 годы. Эти циклы включают два цикла движения, SC03 (рис. 9, b) и US06 (рис. 9, c).

Эти расширенные испытания имеют целью учесть следующие дополнительные условия движения:

- агрессивный стиль вождения;
- резкие ускорения и замедления автомобиля;
- пуск двигателя и резкое трогание с места;
- движение с частыми незначительными изменениями скорости;
- периоды парковки автомобиля;
- движение с включенным кондиционером воздуха.

Предварительная настройка режимов работы для циклов SC03 и US06 включает фазу ct цикла FTP 75 без сбора отработавших газов. Однако, возможны также иные методы настройки.

Испытания по циклу SC03 проводятся при температуре окружающего воздуха 35 °C и относительной влажности 40 % (только для автомобилей, оборудованных кондиционером воздуха). Предусматривается следующее распределение испытаний по отдельным циклам.

Автомобили, оборудованные системами кондиционирования воздуха:
35 % FTP 75 + 37 % SC03 + 28 % US06.

Автомобили без систем кондиционирования воздуха:
72 % FTP 75 + 28 % US06.

Испытательные циклы SFTP и FTP 75 должны быть успешно выполнены по отдельности.

Обогащение топливно-воздушной смеси, необходимое при пуске бензинового двигателя в условиях низких температур, приводит к наибольшей токсичности отработавших газов, которая не может быть измерена при существующих способах испытаний на токсичность, проводимых при температуре окружающего воздуха в диапазоне 20–30 °C. Для автомобилей с бензиновыми двигателями выполняются дополнительные испытания при температуре наружного воздуха –7 °C. Однако для этих испытаний предписана проверка только содержания оксида углерода. Среднее для парка автомобилей предельное содержание NMHC будет введено в течение периода с 2010 по 2013 годы.

Испытательные циклы по определению расхода топлива

Каждый производитель автомобилей должен представить данные о среднем расходе топлива. К производителям, оказавшимся неспособными достичь целевых значений, применяются штрафные санкции.

Расход топлива определяется на основе анализа состава отработавших газов, произведенных в течение двух испытательных циклов: цикла FTP 75 (с весовым коэффициентом 55 %) и цикла испытаний на автомагистрали (с весовым коэффициентом 45 %). Цикл испытаний на автомагистрали без измерений (рис. 9, d) выполняется сразу же после предварительной настройки (автомобиль с выключенным двигателем выдерживается в течение 12 часов при температуре от 20 до 30 °C). Затем при проведении испытаний по циклу движения по автомагистрали берутся пробы отработавших газов. Вычисление расхода топлива выполняется, исходя из содержания CO_2.

Дополнительные испытательные циклы

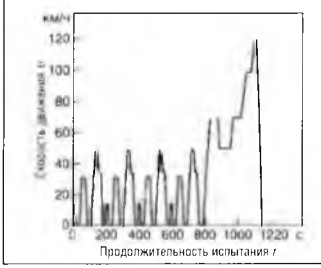
Цикл FTP 72

Цикл FTP 72, также известный как UDDS (городской динамический цикл) соответствует циклу FTP 75, но не включает фазу ht (испытания в горячем состоянии). Этот цикл выполняется для автомобилей с бензиновыми двигателями во время испытаний на потери энергии.

Нью-Йоркский городской цикл (NYCC)

Этот цикл также является элементом испытаний на потери энергии (для автомобилей с бензиновыми двигателями).

Рис. 10. Цикл MNEDC для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей:
расстояние – 11 км;
средняя скорость – 33,6 км/ч,
максимальная скорость – 120 км/ч



Европейские циклы испытаний (для легковых автомобилей/ малотоннажных грузовых автомобилей)

MNEDC

С вступлением в силу норм Евро-3 был введен «Новый модифицированный европейский цикл движения» (MNEDC, рис. 10). В отличие от «Нового европейского цикла движения» (Евро-2), в котором измерения состава отработавших газов начинались только через 40 с после трогания с места, цикл MNEDC также включает фазу пуска холодного двигателя.

Настройка режимов работы

Автомобиль выдерживается в течение, как минимум, 6 ч при температуре от 20 до 30 °С. С 2002 года температура наружного воздуха при пуске двигателя для испытаний Типа VI снижена до –7 °С (только для автомобилей с бензиновыми двигателями).

Сбор отработавших газов

Отработавшие газы собираются в мешки в течение двух фаз испытаний: городского цикла движения (UDC) с максимальной скоростью 50 км/ч и загородного цикла движения (EUDC) с максимальной скоростью 120 км/ч.

Оценка

Масса собранных в ходе испытаний токсичных веществ соотносится с пройденным расстоянием.

WLTP

В течение непродолжительного периода цикл MNEDC должен быть заменен более реалистичным циклом и соответствующей процедурой испытаний (WLTP, всемирный согласованный цикл испытаний для легких автомобилей). Среди прочих, в этом направлении на уровне ООН/ЕЭК работают ЕС, Китай, Индия, Япония, Корея и США.

Рис. 11. Японские испытательные циклы для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей:
a – 11-режимный цикл испытаний (испытания в холодном состоянии); расстояние – 1,021 км; количество циклов – 4; средняя скорость – 30,6 км/ч, максимальная скорость – 60 км/ч;
b – 10 · 15-режимный цикл (испытания в горячем состоянии); расстояние – 4,16 км; количество циклов – 1; средняя скорость – 22,7 км/ч; максимальная скорость – 70 км/ч



Японские циклы испытаний (для легковых автомобилей/ малотоннажных грузовых автомобилей)

Испытания состоят из двух циклов, каждый из которых включает различные искусственные циклы движения. После пуска холодного двигателя 11-режимный цикл движения (рис. 11, a) выполняется 4 раза с оценкой данных, полученных во время каждого из четырех циклов. 10 · 15-режимный цикл движения (рис. 11, b) выполняется однократно после пуска горячего двигателя.

Процедура предварительной настройки включает предписанную проверку токсичности отработавших газов во время работы двигателя на холостом ходу. Процедура заключается в следующем: после прогрева двигателя в течение приблизительно 15 минут во время движения со скоростью 60 км/ч, концентрации HC, CO, и CO_2 измеряются в выхлопной трубе автомобиля во время работы двигателя на холостом ходу. 10 · 15-режимный цикл испытаний в горячем состоянии начинается после второй стадии прогрева в течение 5 минут во время движения со скоростью 60 км/ч.

В то время как в ходе испытаний в холодном состоянии определяется общее количество токсичных веществ в граммах, собранное в течение испытаний, результаты испытании

в горячем состоянии определяются относительно пройденного расстояния и указываются в граммах на километр (г/км).

В 2008 был введен в действие новый цикл испытаний JC08, который первоначально заменил 11-режимный цикл в качестве испытаний в холодном состоянии. С 2011 года используется только цикл JC08 (для испытаний как в холодном, так и в горячем состоянии).

Нормы токсичности, принятые в Японии, включают предельное количество выбросов в виде паров топлива для автомобилей с бензиновыми двигателями, которые измеряются с использование технологии SHED (см. главу «Техника измерения состава отработавших газов»). Аналогичные требования предусмотрены в стандартах США и ЕС/ЕЭК.

Испытательные циклы для большегрузных грузовых автомобилей

Для большегрузных грузовых автомобилей все испытательные циклы выполняются на стендах для испытаний двигателей. В процессе переходных испытательных циклов выбросы отбираются и анализируются в соответствии с принципом CVS. В ходе стационарных испытательных циклов измеряется количество неочищенных выбросов. Количество выбросов указываются в г/кВт·ч.

Европа

Для автомобилей с разрешенной полной массой более 3,5 т и количеством мест более 9 с вводом в действие норм Евро-3 (в октябре 2000 года) был введен 13-ступенчатый цикл испытаний, европей-

Рис. 12. 13-режимные испытания по нормам ЕЭС с европейским циклом на установившихся режимах (ESC)

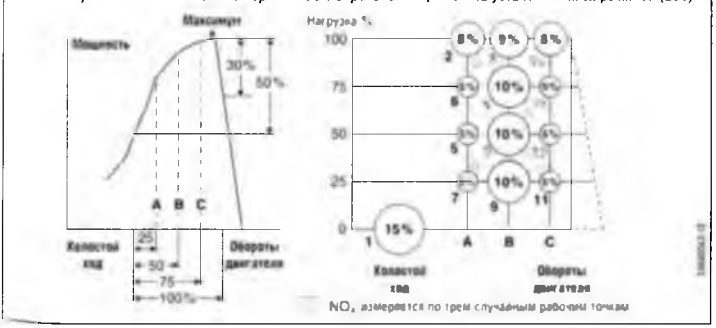
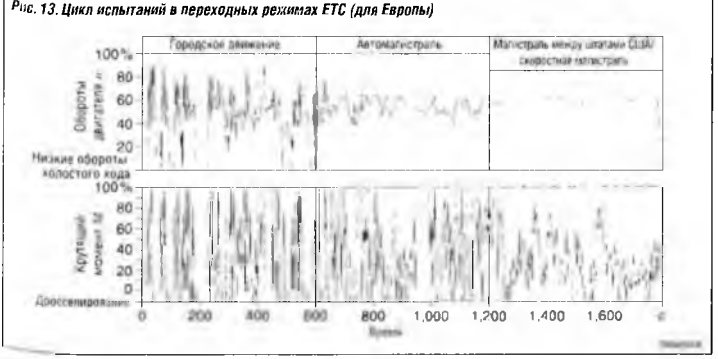


Рис. 13. Цикл испытаний в переходных режимах ETC (для Европы)



ский цикл испытаний в установившихся режимах (ESC, Рис. 12). Цикл испытаний предписывает выполнение измерений в 13 установившихся режимах, определяемых по кривой полной нагрузки двигателя. Выбросы, измеренные в каждой рабочей точке, взвешиваются в соответствии с определенными весовыми коэффициентами. Это также относится к выходной мощности двигателя. Результаты испытаний определяются для каждого токсичного вещества путем деления суммы взвешенного количества выбросов на сумму взвешенных значений выходной мощности.

Во время сертификации могут быть выполнены три дополнительных цикла контроля содержания NO_x. Количество выбросов NO_x не должно значительно отличаться от уровней, измеренных в соседних рабочих точках. Дополнительные испытания имеют целью предотвращение появления модификаций двигателя специально для проведения испытаний.

Так же как нормы Евро-3, цикл ETC (европейский переходной цикл, рис. 13) был введен для определения количества газообразных выбросов и твердых частиц, а цикл испытаний ELR (европейский цикл испытаний последовательных ступеней нагрузки при постоянной частоте вращения) – для измерения дымности выхлопа. В соответствии с нормами Евро-3 цикл ETC применим только к грузовым автомобилям с оборудованием для очистки отработавших газов (сажевые фильтры, каталитические нейтрализаторы DeNOx); с вводом в действие норм Евро-4 (октябрь 2005 года) этот цикл стал обязательным для всех автомобилей.

Цикл испытаний разработан, исходя из реальных условий движения, и включает три раздела: городской цикл, загородный цикл и цикл движения по скоростной автомагистрали. Продолжительность испытаний составляет 30 мин., а периоды времени, в течение которых должны поддерживаться заданные значения частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента, указаны в сек. С введением в 2013 году норм Евро-6 должны быть введены в действие всемирные согласованные испытательные циклы двигателей.

Предписанные предельно допустимые значения должны быть в равной степени соблюдены по результатам циклов WHSC (Всемирный согласованный стационарный цикл) и WHTC (Всемирный согласованный цикл). Новой особенностью является зона WNTE (Всемирная согласованная зона «непревышения»), которая до этого была принята только в США. Испытания NTE выполняются в любом режиме движения в пределах указанного диапазона частоты вращения коленчатого вала/крутящего момента; при этом допускается превышение предельно допустимого количества выбросов приблизительно на 25%. По сравнению с использующимися в настоящее время в Европе циклами испытаний согласованные испытания двигателя предусматривают более низкие нагрузки двигателя (меньшее количество рабочих точек при полной нагрузке, а во время испытаний в переходных режимах – большее количество фаз с высокими оборотами двигателя). Соответствующее снижение температуры отработавших газов представляет проблему для активных систем очистки отработавших газов, требующих регулярной регенерации.

Все европейские испытательные циклы начинаются при горячем двигателе.

США

С 1987 года двигатели для большегрузных грузовых автомобилей испытываются, начиная с холодного пуска, на стендах для испытаний двигателей в соответствии с процедурой цикла испытаний в переходном режиме (TC). Цикл испытаний в основном эквивалентен работе двигателя в реальных условиях дорожного движения (рис. 14). Он включает значительно большее количество фаз работы двигателя на холостом ходу по сравнению с европейским циклом испытаний ETC.

Дополнительными испытаниями является федеральный цикл контроля дымности выхлопа в переходных режимах и квазиустойчивых состояниях.

Начиная с 2007 модельного года, предельные концентрации токсичных веществ для США должны также соответствовать нормам, предписанным для европейских 13-ступенчатых испытаний (ESC). Кроме того, количество выбросов в зоне «непревышения» (т.е. в любом режиме движения в пределах указанного диапазона частоты вращения коленчатого вала/крутящего момента) может превышать предельно допустимые значения на 50%.

Япония

С октября 2005 года количество выбросов определяется в ходе испытательных циклов в переходных режимах JE05. Аналогично европейскому циклу испытаний в переходных режимах для легковых автомобилей цикл JE05 для грузовых автомобилей включает городской цикл, загородный цикл и цикл движения по скоростной автомагистрали. Про-

должительность испытаний составляет 1830 с. Цикл начинается после прогрева двигателя.

В отличие от европейских и американских циклов испытаний, цикл JE05 предписывает использование скорости движения вместо частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента двигателя. Поскольку испытания выполняются на стенде для испытаний двигателей, предписанные скорости движения определяются, исходя из частоты вращения коленчатого вала и индивидуальных параметров автомобиля, при помощи соответствующей программы преобразования. Требуемые параметры среди прочего включают массу автомобиля, сопротивление качению шин, передаточные отношения трансмиссии, кривую крутящего момента и максимальную частоту вращения коленчатого вала. В настоящее время рассматриваются согласованные испытательные циклы WHSC и WHTC.

Список литературы

[1] 70/220/EEC: Council Directive (of the European Communities) of 20 March 1970 on the approximation of laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by gases from positive-ignition engines of motor vehicles.

[2] 88/77/EEC: Council Directive of 3 December 1987 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous pollutants from diesel engines for use in vehicles.

[3] Regulation (EC) No. 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information.

[4] Regulation (EC) No. 595/2009 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2009 on type approval of motor vehicles and engines with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and on access to vehicle repair and maintenance information, and amending Regulation (EC) No. 715/2007 and Directive 2007/46/EC and repealing Directives 80/1269/EEC, 2005/55/EC and 2005/78/EC.

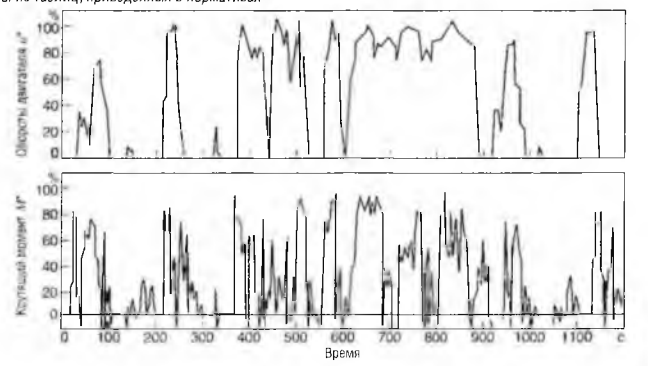
[5] Commission Directive 2010/26/EU of 31 March 2010 amending Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery.

[6] 40 CFR Part 1039: Control of emissions from new and in-use nonroad compression-ignition engines.

[7] 40 CFR Part 86: Control of emissions from new and in-use Highway Vehicles and engines.

Рис. 14. Регламент испытаний в переходных режимах для двигателей большегрузных грузовых автомобилей (США)

Значения номинальной частоты вращения коленчатого вала n^* и номинального крутящего момента M^* взяты из таблиц, приведенных в нормативах



Техника измерения концентраций составляющих отработавших газов

Испытания на токсичность отработавших газов на стенде с беговыми барабанами

Требования

Испытания двигателей на токсичность на стендах с беговыми барабанами выполняются как часть испытаний на соответствие техническим условиям для общей сертификации, а также на стадии разработки двигателей или иных компонентов. Они отличаются от испытаний, проводимых в процессе общего или частичного контроля качества с использованием, например, промышленной измерительной аппаратуры. Испытания на токсичность двигателей большегрузных грузовых автомобилей выполняются на стендах для испытаний двигателей.

Испытания на токсичность на стендах с беговыми барабанами выполняются на автомобилях. Используемые методы имеют целью в максимальной степени приблизить условия испытаний к реальным условиям дорожного движения. Измерения на стендах с беговыми барабанами дают следующие преимущества:

- повторяемость результатов, благодаря неизменным окружающим условиям;
- хорошая сравниваемость результатов благодаря тому, что предписанный цикл испытаний может быть выполнен независимо от интенсивности дорожного движения;
- возможность использования стационарной измерительной аппаратуры.

Выполнение испытаний

Общая настройка

Автомобиль устанавливается на стенд с беговыми барабанами, ведущими колесами на ба-

Рис. 1. Измерение состава отработавших газов на стенде с беговыми барабанами:
1 – беговой барабан с динамометром, 2 – первичный каталитический нейтрализатор, 3 – основной каталитический нейтрализатор; 4 – фильтр; 5 – фильтр твердых частиц, 6 – смесительный канал; 7 – смеситель Mix-T; 8 – клапан 9 – кондиционер воздуха разбавления; 10 – воздух разбавления, 11 – смесь отработавших газов с воздухом, 12 – вентилятор, 13 – система CVS (система отбора проб при постоянном объеме), 14 – мешок для сбора проб воздуха разбавления; 15 – мешок для сбора проб отработавших газов (после смесителя Mix-T), 16 – мешок для сбора проб отработавших газов (из канала разбавления); 17 – счетчик твердых частиц; ① – тракт отработавших газов через смеситель Mix-T (без определения концентрации твердых частиц); ② – тракт отработавших газов через канал разбавления (с определением концентрации твердых частиц)



раб- (рис. 1). Это означает, что силы, воздейств щие на автомобиль, т.е. моменты инерции, сопр отивление качению и аэродинамическое сопр отивление должны моделироваться таким обр зом, чтобы количество выбросов, производ лых во время испытаний на стенде, было сра ничимо с количеством, производимым во вре я дорожных испытаний. Для этой на старых сте- ах использовались асинхронные электродви тели, двигатели постоянного тока или даже эле родинамические замедлители, генерирующие зависимые от скорости нагрузки, воздейсте щие на ролики. На более современных ма инах для воспроизведения этой инерции пр еняются электрические маховики. На более ста ых испытательных стендах для моделирования ассы автомобиля используются маховики ра личных размеров, присоединяемые к ролика при помощи быстродействующих соединительных муфт. Охлаждение обеспечивается ве лятором, располагаемым на небольшом ра тоянии от автомобиля.

Выхлопная труба автомобиля герметично соед няется с системой сбора отработавших газов – система разбавления газов описана ниже. Здесь собирается часть отработавших газов. По ок чании испытаний выполняется анализ отра отавших газов на предмет содержания токси ных веществ (углеводородов, оксидов азота и сида углерода), а также диоксида углерода (для определения расхода топлива).

После ввода в действие норм контроля токсичности отработавших газов предельное содержание твердых частиц было первоначально установлено только для автомобилей с дизельными двигателями. В течение нескольких последних лет законодатели начали распространять эти ограничения также на автомобили с бензиновыми двигателями. Для определения содержания твердых частиц используется так называемый «смесительный канал», в котором создается высокая внутренняя турбулентность потока (число Рейнольдса > 4 000). Для вычисления количества выбросов в виде твердых частиц в зависимости от нагрузки также используются фильтры.

Кроме того, в исследовательских целях часть отработавших газов может непрерывно отбираться в соответствующих точках системы выпуска отработавших газов автомобиля или смесительного канала для анализа концентраций различных токсичных веществ. Цикл испытаний повторяется водителем на автомобиле. Требуемая и фактическая скорости движения отображаются на мониторе.

В некоторых случаях, с целью улучшения повторяемости результатов вместо водителя используется автоматическая система управления движением.

Наладка стенда для испытаний автомобилей с дизельными двигателями

Для определения количества выбросов, производимых автомобилями с дизельными двигателями, необходимо выполнить определенную переналадку испытательного стенда и в определенной степени изменить технологию измерений. Вся система отбора проб, включая измеритель концентрации углеводородов, должна быть нагрета до 190 °C. Это необходимо для того, чтобы предотвратить конденсацию углеводородов, которые имеют высокую точку кипения, или испарить углеводороды, которые уже сконденсировались на компонентах системы выпуска отработавших газов.

Система разбавления

Наиболее распространенным методом сбора отработавших газов является процедура разбавления CVS (отбор проб при постоянном объеме). Впервые он был применен в США в 1972 году для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей. С тех пор метод несколько раз модифицировался. Метод CVS используется также в некоторых других странах, например, в Японии. С 1982 года этот метод применяется также в Европе. Таким образом, на сегодняшний день этот метод сбора отработавших газов признан во всем мире.

Цели

При использовании метода CVS анализ состава отработавших газов выполняется только после окончания испытаний. При этом должны быть выполнены следующие требования:

- необходимо предотвратить конденсацию водяных паров, в противном случае будет иметь место потеря оксидов азота;
- необходимо предотвратить возникновение в собранных отработавших газах вторичных реакций.

Принцип метода CVS

Метод CVS заключается в следующем. Отработавшие газы от испытуемого автомобиля смешиваются в смесителе Mix-T или в смесительном канале с наружным воздухом в соотношении от 1:5 до 1.10 и откачиваются при помощи специальной системы насосов таким образом, что общий объемный расход отрабо-

тавших газов и воздуха остается постоянным. Следовательно, расход добавочного воздуха зависит от моментального объемного расхода отработавших газов. Из потока разбавленных ОГ в один или более мешков непрерывно отбираются репрезентативные пробы. Во время наполнения мешков объемный расход газа постоянен. Следовательно, концентрация токсичных веществ в мешке для сбора проб по окончании заполнения идентична среднему значению концентрации токсичных веществ в разбавленных отработавших газах во время процесса наполнения мешков.

Во время наполнения мешков отработавшими газами также отбирается проба воздуха, предназначенного для разбавления, для определения концентрации в нем токсичных веществ.

Отбор проб отработавших газов в мешки производится в соответствии с фазами испытательного цикла (например, фаза ht испытательного цикла FTP 75).

Массы токсичных веществ, произведенных во время испытаний, вычисляется, исходя из общего объема разбавленных отработавших газов и концентраций токсичных веществ в собранных отработавших газах и воздухе разбавления.

Системы разбавления газов

Для получения постоянного объемного расхода разбавленных отработавших газов существуют два альтернативных метода:

- метод PDP (объемный насос): используется роторно-поршневой вентилятор (воздуходувка Рутса);
- метод CFV (критический расход Вентури): в критическом состоянии используются трубка Вентури и стандартная воздуходувка.

Усовершенствования метода CVS

Разбавление отработавших газов вызывает снижение концентраций в них токсичных веществ, зависящее от степени разбавления. Концентрации некоторых токсичных веществ (в особенности углеводородных соединений) в разбавленных отработавших газах в некоторых фазах испытаний сравнимы с концентрациями в воздухе разбавления (или ниже), поскольку за последние годы содержание токсичных веществ в выбросах было значительно снижено в связи с введением в действие все более строгих норм. Это представляет собой проблему с точки зрения технологии измерений, поскольку разность двух значений имеет большое значение для определения количества выбросов. Еще одной проблемой является точность измерительной аппаратуры.

Решить указанные проблемы могут помочь следующие меры:

- снижение степени разбавления; при этом требуется принять меры к предотвращению образования конденсата, например, нагрева тех или иных секций системы разбавления отработавших газов, или осушения и нагрева воздуха разбавления (на автомобилях с бензиновыми двигателями);
- снижение и стабилизация концентраций токсичных веществ в воздухе разбавления, например, при помощи фильтров на основе активированного угля;
- оптимизация измерительной аппаратуры (включая системы разбавления), например, путем правильного выбора или предварительного кондиционирования материалов, надлежащей настройки системы или использования современной электронной контрольно-измерительной аппаратуры;
- оптимизация процессов, например, посредством специальных процедур продувки.

Система разбавления газов Bag Mini Diluter

В качестве альтернативы для технологии CVS в США была раработана система разбавления отработавших газов нового типа под названием Bag Mini Diluter (BMD). Здесь часть потока отработавших газов разбавляется с постоянным соотношением сухим, нагретым и не содержащим токсичных веществ «нулевым газом» (например, очищенным воздухом). Во время испытаний часть потока этих разбавленных отработавших газов собирается в мешки для отбора проб. По окончании испытаний выполняется анализ собранных проб.

В ходе этой процедуры разбавление отработавших газов производится не содержащим токсичных веществ «нулевым газом» Использование для разбавления очищенного от токсичных веществ газа имеет целью избежать необходимости в учете концентраций токсичных веществ в воздухе разбавления Однако, по сравнению с методом CVS это требует более сложной процедуры, например, одними из требования являются определение объемного расхода (неразбавленных) отработавших газов и пропорциональный отбор проб.

Аппаратура для измерения концентраций токсичных веществ в отработавших газах

Для автомобилей с бензиновыми двигателями, количество газообразных токсичных веществ в пробах вычисляется исходя из концентрации токсичных веществ в пробах отработавших газов и воздуха разбавления. Стандартная процедура для этой цели (см. табл. 1) определена нормами контроля токсичности отработавших газов.

В основном, для измерения концентраций газообразных токсичных веществ в отработавших газах автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями используется одна и та же измерительная аппаратура. Однако в отношении измерения концентрации углеводородов (HC) имеют место некоторые различия: анализу подвергается не содержимое мешков для сбора проб, а часть непрерывного потока разбавленных отработавших газов. Затем к полученному значению прибавляется концентрация, измеренная в ходе дорожных испытаний. Причина такого подхода заключается в том, что углеводороды (имеющие высокую температуру кипения) конденсируются в (ненагретом) мешке для сбора проб отработавших газов.

Таблица 1. Методики испытаний

Компоненты	Методика
CO, CO_2	Недисперсионный инфракрасный анализатор (NDIR)
Оксиды азота (NO_x)	Хемилюминесцентный детектор (CLD)
Общее содержание углеводородов (THC)	Пламенно-ионизационный детектор (FID)
CH_4	Комбинация газовой хроматографии и пламенно-ионизационного детектора (GC FID)
CH_3OH, CH_2O	Комбинация импинджера или картриджного фильтра и хроматографического анализа, обязательна в США при использовании определенных видов топлива
Твердые частицы	1) Гравиметрический метод взвешивание фильтров твердых частиц до и после дорожных испытаний. 2) подсчет количества твердых частиц

В исследовательских целях на многих испытательных стендах установлены системы непрерывного измерения концентраций токсичных веществ в системе выпуска отработавших газов автомобиля или в системе разбавления отработавших газов. Это необходимо для получения данных о тех или иных подлежащих контролю компонентах, а также компонентах, на которые требования норм не распространяются. Для этого требуется использовать методы испытаний, не указанные в табл. 1, например:

- парамагнитный метод (для измерения концентрации O_2);
- детектор Cutter FID: комбинация пламенно-ионизационного детектора и поглотителя неметановых углеводородов (для измерения концентрации CH_4);
- массовая спектроскопия (многокомпонентный анализатор);
- FTIR-спектроскопия (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, многокомпонентный анализатор);
- инфракрасная лазерная спектроскопия (многокомпонентный анализатор).

Ниже приведены описания некоторых измерительных приборов.

NDIR-анализатор

NDIR-анализатор (недисперсионный инфракрасный анализатор) использует свойство некоторых газов поглощать инфракрасное излучение в узком диапазоне длин волн. Поглощенное излучение преобразуется в энергию колебаний или вращения молекул поглощающего вещества. В свою очередь эту энергию можно измерить, как тепловую энергию. Вышеописанное явление относится к веществам, молекулы которого состоят из атомов как минимум двух различных элементов, например, CO, CO_2, C_6H_{14} или SO_2.

Существует несколько вариантов NDIR-анализаторов; основными компонентами являются источник инфракрасного излучения (рис. 2), поглощающая ячейка (кювета), через которую проходит газ, эталонная ячейка, обычно расположенная параллельно поглощающей ячейке (заполненная инертным газом, например, N_2), вращающийся прерыватель и детектор. Детектор состоит из двух камер, соединенных мембраной и содержащих образцы анализируемых газов. Излучение из эталонной ячейки поглощается в одной камере детектора, а из кюветы – в другой.

Интенсивность излучения из кюветы может быть снижена за счет поглощения испытуемым газом. Разность энергий излучения вызывает возникновение потока, который может быть измерен датчиком потока или датчиком давления. Вращающийся прерыватель прерывает инфракрасное излучение, что вызывает изменение направления потока и, следовательно, модуляцию сигнала датчика.

NDIR-анализаторы очень чувствительны к присутствию в анализируемом газе влаги, поскольку молекулы H_2O поглощают инфракрасное излучение в широком диапазоне длин волн. По этой причине NDIR-анализаторы располагаются после системы обработки газа (например, газоохладителя), служащей для осушения отработавших газов, если выполняются измерения неразбавленных отработавших газов.

Хемилюминесцентный детектор (CLD)

В реакционной камере испытуемый газ смешивается с озоном, производимым из кислорода посредством электрического разряда (рис. 3). В этой среде оксид азота, содержащийся в испытуемом газе, окисляется до диоксида азота. Некоторые из вновь образовавшихся молекул находятся в возбужденном состоянии. Когда эти молекулы возвращаются в исходное состояние, происходит высвобождение энергии в виде света (хемилюминесценция). Величина излученной световой энергии измеряется детектором (например, фотоумножителем). При определенных условиях величина этой энергии пропорциональна концентрации оксида азота (NO) в испытуемом газе.

Поскольку стандарт устанавливает общее предельное содержание оксидов азота в отработавших газах, требуется определять количество молекул NO и NO_2. Однако, т.к. принцип действия хемилюминесцентного детектора ограничивает область его применения измерением только концентрации NO, испытуемый газ пропускается через преобразователь, в котором диоксид азота восстанавливается до оксида азота.

Пламенно-ионизационный детектор (FID)

Испытуемый газ сжигается в пламени водорода (см. рис. 4), в результате чего образуются углеродные радикалы, некоторые из которых временно ионизируются. Ионизированные радикалы разряжаются на электроде коллектора. Величина возникающего при этом электрического тока пропорциональна количеству атомов углерода в испытуемом газе.

Детекторы GC FID и Cutter FID

Существуют два основных метода измерения концентрации метана в испытуемом газе. Оба метода включают использование комбинации сепаратора метана (CH_4) и пламенно-ионизационного детектора. Для сепарирования метана используется хроматографическая колонка (GC FID), или нагреваемый каталитический нейтрализатор, окисляющий отличные от метана углеводороды.

В отличие от детектора cutter FID, детектор GC FID может определять концентрацию CH_4 только в прерывистом режиме (типичные интервалы между измерениями составляют от 30 до 45 секунд).

Рис. 2. Измерительная камера анализатора NDIR:
1 – выпуск газа; 2 – поглощающая ячейка; 3 – впуск испытуемого газа, 4 – оптический фильтр, 5 – источник инфракрасного света, 6 – инфракрасное излучение, 7 – эталонная ячейка 8 – вращающийся прерыватель, 9 – детектор



Рис. 3. Конструкция хемилюминесцентного детектора (CLD):
1 – реакционная камера, 2 – впуск озона; 3 – впуск испытуемого газа, 4 – выпуск газа, 5 – фильтр, 6 – детектор



Парамагнитный детектор (PMD)
Существуют различные конструкции парамагнитных детекторов (в зависимости от изготовителя). Принцип действия этих детекторов заключается в том, что в неоднородных магнитных полях вещества с парамагнитными свойствами (такого как кислород) воздействуют на молекулы. Возникающие при этом силы вызывают движение молекул. Это движение регистрируется специальным детектором и его интенсивность пропорциональна концентрации молекул в испытуемом газе.

Измерение содержания твердых частиц
Кроме измерения концентрации газообразных токсичных веществ, измеряется содержание в отработавших газах твердых частиц, поскольку они также являются загрязняющими агентами, содержание которых ограничивается нормами. В настоящее время законодательство предписывает использование для измерения содержания твердых частиц гравиметрического метода.

Гравиметрический метод (с использованием фильтра твердых частиц)
Часть разбавленных отработавших газов отбирается из канала разбавления во время дорожных испытаний и пропускается через фильтры твердых частиц. Количество твердых частиц в отработавших газах (нагрузка фильтров) вычисляется, как разность весов фильтров твердых частиц до испытания и после него. Затем содержание твердых частиц, произведенных во время испытания, вычисляется, исходя из нагрузки фильтров, общего объема разбавленных отработавших газов и частичного объема отработавших газов, прошедших через фильтры твердых частиц.

Гравиметрический метод имеет следующие недостатки:
- относительно высокий предел детектирования, который можно только в ограниченной степени снизить, при помощи сложной измерительной аппаратуры, а также путем оптимизации геометрии канала;
- невозможность непрерывного измерения содержания твердых частиц;
- необходимость в сложном кондиционировании фильтров твердых частиц с целью сведения к минимуму влияния окружающей среды;
- невозможность определения химического состава и размеров твердых частиц.

Подсчет количества твердых частиц
В связи с вышеуказанными недостатками гравиметрического метода и с целью снижения предельных значений, некоторые законодатели в будущем также ограничат не только массу, но и количество твердых частиц.

В качестве устройства для подсчета количества твердых частиц в соответствии со стандартом был заявлен «Конденсационный счетчик твердых частиц» (CPC). В этом счетчике небольшая часть потока разбавленных отработавших газов (аэрозоль) смешивается с насыщенными парами бутанола. Конденсация паров бутанола на твердых частицах вызывает значительное увеличение размера частиц, что дает возможность подсчитать их количество в рассеянном свете.

Количество твердых частиц в разбавленных отработавших газах определяется непрерывно. Интегрирование измеренных значений позволяет получить количество твердых частиц, произведенных во время испытаний.

Определение распределения твердых частиц по размеру
В настоящее время возрастает интерес к распределению твердых частиц, содержащихся в отработавших газах по размеру. Примерами устройств, позволяющих получать такие данные, являются:
- сканирующий мобильный определитель размеров частиц (SMPS);
- электрический импактор низкого давления (ELPI);
- дифференциальный мобильный спектрометр (DMS).

***Рис. 4** Конструкция пламенно-ионизационного детектора:*
1 – выпуск газа; 2 – электрод коллектора; 3 – усилитель; 4 – воздух для горения, 5 – впуск испытуемого газа; 6 – горючий газ (H_2/He), *7 – горелка*



Испытания грузовых автомобилей

Измерения количества выбросов дизельных двигателей большегрузных грузовых автомобилей массой свыше 8500 фунтов, требуемые в США, начиная с 1986 модельного года, и в Европе, с вступлением силу норм Евро-4 для автомобилей массой свыше 3,5 т производится на динамических испытательных стендах с использованием метода CVS (отбор проб при постоянном объеме). Однако, в связи с большими размерами двигателей, для обеспечения такой же степени разбавления отработавших газов, как для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей, требуется значительно более высокая производительность вентиляторов. Двойное разбавление (через вторичный канал), одобренное законодателем, помогает в некоторой степени решить эту проблему.

Требуемый объемный расход разбавленных отработавших газов в критических условиях может быть обеспечен при помощи воздуходувки Рутса или трубки Вентури. Другой возможностью является определение содержания твердых частиц в частичном потоке разбавленных отработавших газов (при условии измерения концентраций остальных токсичных веществ в необработанных отработавших газах).

Также ожидается, что с введением следующих, более строгих норм (например, Евро-6), для большегрузных грузовых автомобилей будут также установлены предельно допустимые значения количества твердых частиц.

Определение дымности выхлопа дизельных двигателей

Процессы

Отдельные нормы, касающиеся проверки дымности выхлопа дизельных двигателей, вступили в силу задолго до ввода в действие норм, касающихся контроля содержания в отработавших газах газообразных токсичных веществ. Все существующие методы контроля дымности тесно связаны с используемым оборудованием. Одной из мер дымности выхлопа (содержания сажи, твердых частиц) является дымовое число. В настоящее время для измерения этой величины в основном применяются два метода.

- отличический метод (измерение непрозрачности или потемнения ОГ) основан на определении ослабления светового потока при просвечивании ОГ (см рис 5);
- при использовании фильтрационного метода (измерение отраженного света) определенное количество отработавших газов пропускается через фильтрующий элемент. Степень почернения фильтра характеризует содержание сажи в отработавших газах (см. рис. 6).

Определение дымности выхлопа дизельных двигателей проводится только при работе двигателя под нагрузкой, поскольку только в этом режиме двигатель производит значительное количество твердых частиц. Здесь наиболее распространены два разных метода проведения испытаний:

- измерение при полностью открытой дроссельной заслонке, например, на стенде с беговыми барабанами или ином стенде под нагрузкой, создаваемой тормозами автомобиля;
- измерение при неограниченном ускорении, при резком открытии дроссельной заслонки и нагруженном двигателе (рис. 7).

Так как результаты измерений дымности выхлопа варьируются в зависимости от метода проведения испытаний и нагрузки, сравнить их напрямую нельзя.

Дымомер оптического типа (абсорбционный метод)

Непрозрачность отработавших газов определяется степенью ослабления света, проходящего через ОГ за счет абсорбции, дифракции и отражения света от твердых частиц, содержащихся в отработавших газах.

Для измерения полного потока на выхлопной трубе монтируются излучатель и фотодетектор. В устройствах с отбором части потока отработавшие газы проходят через пробоотборный зонд и через трубопроводы с нагревателями нагнетаются насосом в измерительную камеру. Основное преимущество такой системы заключается в более высокой чувствительности, благодаря использованию более длинной измерительной камеры.

Во время свободного ускорения часть отработавших газов, выходящих из выхлопной трубы, проходит через пробоотборный зонд (см. рис. 5) и пробоотборный шланг и поступает в камеру (без вспомогательного вакуума). Поскольку давление и температура контролируются, на результаты измерений не оказывают влияния колебания давления отработавших газов.

Через отработавшие газы, находящиеся в испытательной камере, пропускаются световые лучи. Фотоэлементы регистрируют снижение интенсивности света после прохождения камеры; это снижение соответствует непрозрачности T (в %) или коэффициенту абсорбции k. Точно определенная длина камеры и поддержание в чистоте оптического окна (при помощи воздушной завесы, т.е. поперечного воздушного потока) являются основными условиями обеспечения высокого уровня точности и повторяемости результатов измерений.

Во время испытаний под нагрузкой обеспечивается непрерывный процесс измерений дымности с индикацией получаемых данных. Результаты испытаний при свободном ускорении могут быть сохранены в виде кривой изменений дымности в цифровом виде. Дымометр автоматически определяет максимальное значение и производит расчет среднего значения дымности для нескольких периодов подачи газа (см. рис. 7).

Дымомер (фильтрационный метод)

В соответствии с этим методом измерений определенный объем отработавших газов прокачивается через бумажный фильтр (см. рис. 6). Степень зачернения бумаги выражается в виде показателя содержания сажи Bosch (от нуля до десяти).

Недостаток этого метода, связанный с ограниченным объемом всасывания в случае

Рис. 6. Дымомер (фильтрационный метод):
1 – бумажный фильтр;
2 – испытуемый газ;
3 – светоотражающий фотометр;
4 – транспортер бумаги;
5 – измерительный объем;
6 – распределители продувочного воздуха;
7 – насос

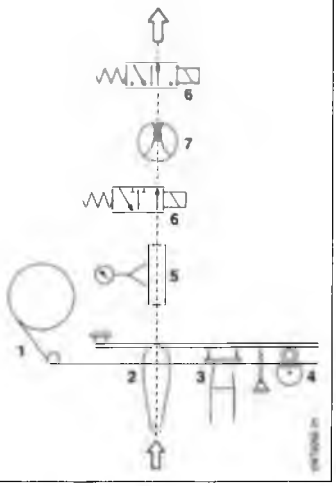
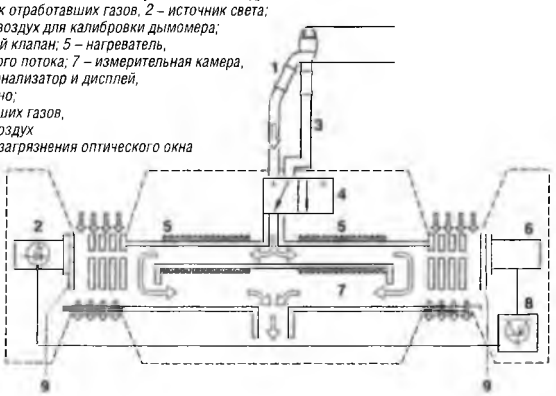


Рис. 5. Дымомер оптического типа (абсорбционный метод):
1 – пробоотборник отработавших газов, 2 – источник света;
3 – продувочный воздух для калибровки дымомера;
4 – калибровочный клапан; 5 – нагреватель,
6 – датчик светового потока; 7 – измерительная камера,
8 – электронный анализатор и дисплей,
9 – оптическое окно;
путь отработавших газов,
продувочный воздух
для защиты от загрязнения оптического окна



малых концентраций сажи, можно скомпенсировать при помощи непрерывно работающего насоса. Степень зачернения бумаги затем преобразуется в стандартный объем при стандартных условиях. Система также учитывает «мертвый объем» между пробоотборником и бумажным фильтром.

Для оптико-электронной оценки почернения фильтрующей бумаги применяется светоотражающий фотометр. Результат предоставляется в виде показателя сажесодержания Bosch или дымового числа фильтра (FSN). Для перевода дымового числа в концентрацию по массе в мг/м³ может быть применена эмпирическая корреляция.

Испытания на выделение паров топлива

Кроме токсичных веществ, образующихся в процессе сгорания топлива, автомобиль с бензиновым двигателем выпускает в атмосферу определенное количество углеводородов (HC) в виде паров топлива вследствие испарения топлива из топливного бака и компонентов топливной системы. Количество паров топлива зависит от конструкции автомобиля и температуры топлива. В некоторых странах (в США и ЕС) уже приняты законы, ограничивающие предельные потери топлива на испарение.

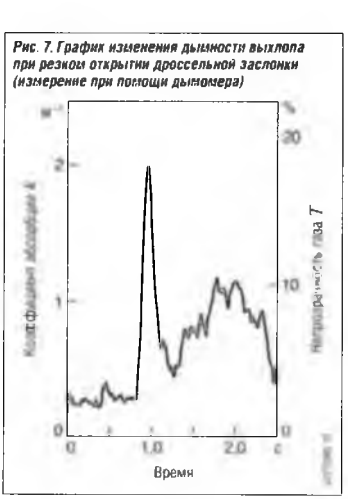


Рис. 7. График изменения дымности выхлопа при резком открытии дроссельной заслонки (измерение при помощи дымомера)

Метод испытаний

Количественная оценка потерь на испарение топлива обычно осуществляется с использованием камеры SHED (герметичная камера для определения потерь на испарение). Во время испытаний концентрации углеводородов измеряются в начале и конце испытания при помощи пламенно-ионизационного детектора (FID); разность значений представляет собой потери на испарение.

В зависимости от страны, потери на испарение должны измеряться во всех или только некоторых, указанных ниже состояниях и не должны превышать установленных предельно допустимых значений:

- испарение топлива из топливной системы запаркованного автомобиля с горячим двигателем: «горячий парковочный тест» или «выдержка в горячем состоянии» (ЕС и США);
- испарение топлива из топливной системы в течение дня: «вентиляционный тест топливного бака» или «суточный тест» (ЕС и США);
- испарение топлива во время движения, например, вследствие недостаточной герметичности соединений: тест на потери во время движения (США).

Потери на испарение измеряются в несколько этапов, в соответствии с детально предписанной процедурой испытаний. Перед испытаниями автомобиль проходит процесс предварительной выдержки с использованием угольного фильтра для улавливания паров бензина. Испытания начинаются, когда бачок фильтра заполняется до предписанного уровня 40%.

Процедуры испытаний

1-ое испытание: Потери на испарение во время выдержки в горячем состоянии

Для измерения потерь на испарение на этой стадии двигатель автомобиля предварительно прогревается в соответствии с процедурой, предписанной в той или иной стране. Затем двигатель выключается, и автомобиль помещается в герметичную испытательную камеру (SHED). Затем определяется увеличение концентрации CH за 1 час охлаждения.

Во время испытаний окна и крышка багажника автомобиля должны оставаться открытыми. Это позволит включить в процесс из-

мерений пары топлива, выходящие из салона автомобиля.

2-ое испытание: Потери на испарение из топливного бака

Для проведения этих испытаний предписан типичный температурный профиль, соответствующий жаркому летнему дню (макс. температура для ЕС: 35 °С, для EPA: 35,5 °С, для CARB: 40,6 °С), который имитируется в герметичной климатической камере. В процессе испытаний производится сбор углеводородов, испарившихся из автомобиля при этих условиях.

В США требуется проведение двухсуточного теста (48 часов; эксплуатационные испытания) и трехсуточного теста (72 часа; сертификация) (в каждом случае берется максимальное значение, полученное в течение суток). Стандарт ЕС предусматривает 24-часовое испытание.

3-е испытание: потери на испарение во время движения

Проверка потерь на испарение во время движения выполняется перед выдержкой в горячем состоянии (1-ое испытание). Она служит для оценки выбросов углеводородов во время выполнения предписанных испытательных циклов(1 – цикл FTP-72, 2 – цикл NYCC, 1 – цикл FTP-72; см. раздел «Испытательные циклы для США»).

Предельно допустимые значения

Стандарт ЕС

Потери на испарение равны сумме результатов первого и второго испытаний. Сумма полученных значений при обоих испытаниях должна быть меньше, чем принятое предельное значение – 2 г паров углеводородов.

США

В США (законодательство CARB и EPA, Tier 1), потери на испарение во время движения не должны превышать 0,05 г на милю пробега. Дополнительные предельно допустимые значения:

- 2-суточный тест + выдержка в горячем состоянии: 2,5 г;
- 3-суточный тест + выдержка в горячем состоянии. 2,0 г.

Соответствие этим требованиям должно быть продемонстрировано на протяжении пробега 50 000 миль

В рамках стандарта EPA, Tier 2 и CARB LEVII эти предельно допустимые значения еще более ужесточены:

- 2-суточный тест + выдержка в горячем состоянии:
  1,2 г (EPA)/0,65 г (CARB);
- 3-суточный тест + выдержка в горячем состоянии:
  0,95 г (EPA)/0,50 г (CARB)

Эти предельные значения не должны быть превышены на протяжении пробега 120 000 миль (EPA) или 150 000 миль (CARB). Эти предельные значения были поэтапно введены в действие, начиная с 2004 модельного года, и окончательно вступили в силу, начиная 2007 модельного года (EPA) или 2006 модельного года (CARB). Начиная с 2009 модельного года, EPA разрешает сертификацию в соответствии с пределами, установленными законодательством CARB и нормами CARB (согласование)

Потери на испарение во время заправки автомобиля топливом

Заправочный тест

В процессе заправочного теста измеряется количество углеводородов, испарившихся во время заправки автомобиля топливом (предельно допустимое значение: 0,053 г НС на 1 литр заправленного топлива).

В США этот тест предусмотрен законодательствами CARB и EPA.

Испытания на выплескивание топлива

В процессе этого испытания измеряется количество топлива, выплеснувшегося во время заправки. Бак должен заполняться не менее, чем на 85 % его общего объема.

Это испытание выполняется только в случае превышения допустимого предела во время заправочного теста (предельно допустимое значение: 1 г НС в ходе всего испытания).

Диагностика

Введение

Широкое применение в автомобилестроении электронных устройств, использование программного управления и все возрастающая сложность современных систем впрыска топлива предъявляют высокие требования к системам диагностики, которые подразделяются на бортовые системы диагностики, функционирующие во время движения автомобиля, и системы, применяемые в автомобильных мастерских.

Система диагностики в мастерских основана на процедуре поиска и устранения неисправностей, связывающей воедино многочисленные возможности бортовых и внешних контрольно-измерительных устройств и испытательного оборудования. В связи с тем, что требования к ограничению токсичности отработавших газов становятся все более строгими, в настоящее время требуется постоянный мониторинг состояния автомобиля во время движения. Законодатели признали систему бортовой диагностики, как вспомогательную систему контроля токсичности отработавших газов, и разработали соответствующие стандарты. Эта дополнительная система получила название системы OBD (система бортовой диагностики).

Алгоритмы мониторинга используются для контроля входных и выходных сигналов во время движения автомобиля и проверки всей системы и соответствующих функций на предмет неисправностей и повреждений. Любые ошибки или неисправности сохраняются в памяти блока управления. Во время технического обслуживания автомобиля в сервисном центре эти данные экспортируются через последовательный интерфейс. Это позволяет быстро находить неисправности и выполнять необходимый ремонт.

Мониторинг во время движения

Диагностические функции электронного блока управления относятся к основным функциям электронных систем управления двигателем. В ходе самодиагностики блока управления выполняется проверка входных и выходных сигналов и связи между различными компонентами системы.

Мониторинг входных сигналов

Состояние датчиков, соединителей и соединительных линий (путей прохождения сигналов) с блоком управления контролируется с использованием оцениваемых входных сигналов. Используя эту стратегию мониторинга, можно определить неисправности датчиков, короткие замыкания цепей питания от аккумуляторной батареи (напряжение U_{Batt}), короткие замыкания на «массу» и обрывы цепей. Для этой цели используются следующие процедуры:

- мониторинг напряжения питания датчиков (при наличии);
- проверка величины сигналов на предмет выхода за допустимые пределы (например, от 0,5 до 4,5 В);
- если доступна дополнительная информация, выполняется проверка допустимости с использованием измеренного значения (например, сравнение частоты вращения коленчатого вала и распределительного вала);
- системы разработаны с резервированием критичных компонентов (таких как датчик положения педали акселератора). Это позволяет производить прямое сравнение сигналов датчиков

Мониторинг выходных сигналов

Мониторинг исполнительных механизмов и устройств, управляемых блоком управления, осуществляется через выходные цепи блока управления. Функциями этого мониторинга в дополнение к определению неисправностей самих устройств является определение коротких замыканий или обрывов в соединительных линиях. Для этой цели используются следующие процедуры:

- мониторинг выходных сигналов. Электрические цепи проверяются на предмет коротких замыканий в цепях питания от аккумуляторной батареи (напряжение U_{Batt}), коротких замыканий на «массу» и обрывов цепей;
- воздействия на систему исполнительных механизмов определяются прямо или косвенно посредством функции контроля достоверности. Состояние исполнительных устройств системы, например, клапана системы рециркуляции отработавших газов, дроссельной заслонки или завихряющей заслонки контролируется косвенным способом (например, по реакциям системы), а также частично при помощи датчиков положения (например, датчика положения заслонки вихревых каналов).

Мониторинг внутренних функций электронного блока управления

Функции мониторинга реализуются в аппаратуре блока управления (например, «интеллектуальными» выходными модулями) и программным способом и имеют целью обеспечение его постоян-

ного правильного функционирования. В процессе мониторинга выполняется проверка состояния всех компонентов блока управления (например, микропроцессора, стираемого программируемого постоянного запоминающего устройства – СППЗУ и оперативного запоминающего устройства – ОЗУ). Многие тесты выполняются сразу же после включения зажигания. Затем функции мониторинга выполняются с регулярными интервалами, что позволяет своевременно определять неисправности также во время работы. Процедуры тестирования, требующие большого объема вычислений, или не выполняемые во время работы двигателя по иным причинам, выполняются после выключения двигателя. Это позволяет избежать влияния на другие функции. Примером такой функции является проверка состояния постоянного запоминающего устройства – ПЗУ.

Мониторинг связи между электронными блоками управления

Связь между различными электронными блоками управления обычно осуществляется по шине CAN. Механизмы определения ошибок встроены в протокол CAN, поэтому ошибки связи могут быть обнаружены уже на уровне чипа CAN. Блок управления также выполняет большое количество других тестов. Поскольку большинство сообщений передается по шине CAN отдельными блоками управления с регулярными интервалами, отказ контроллера шины CAN в блоке управления может быть определен посредством контроля этих интервалов. Если в блоке управления записана дополнительная информация, все входные сигналы проверяются посредством сравнения с этой информацией.

Обработка ошибок/неисправностей

Обнаружение ошибок/неисправностей

Путь сигнала классифицируется как полностью дефектный, если неисправность возникает по истечении определенного интервала времени. До тех пор, пока дефект на будет классифицирован, система будет использовать последнее зарегистрированное значение. После того как дефект будет классифицирован, включается функция ожидания (например, используется фиксированное значение температуры двигателя $T = 90\,^{\circ}C$).

Для большинства ошибок доступна функция «распознавания восстановленного сигнала». Для этого необходимо, чтобы путь сигнала в течение определенного времени был определен, как исправный

Запись ошибок/неисправностей

Все неисправности записываются в энергонезависимой памяти в виде кодов ошибок. Код ошибки включает также вид неисправности (например, короткое замыкание, обрыв цепи, недостоверность сигнала, выход за пределы допустимого диапазона). Каждая запись кода неисправности сопровождается записью дополнительной информации, например, условий эксплуатации на момент возникновения неисправности («стоп-кадр») (например, частота вращения коленчатого вала, температура двигателя).

Функции в аварийном режиме

При возникновении неисправности в дополнение к использованию фиксированных значений определенных параметров те или иные системы автомобиля могут быть переведены в аварийный режим (например, режим ограничения выходной мощности двигателя или скорости движения). Эти меры направлены на обеспечение безопасности, предотвращение дальнейших повреждений (например, вследствие перегрева каталитического нейтрализатора) и сведение к минимуму токсичности выбросов.

Системы бортовой диагностики (OBD)

Чтобы обеспечить соблюдение требований законодательства в отношении ограничения токсичности отработавших газов, необходимо во время движения автомобиля непрерывно контролировать состояние двигателя и иных компонентов. Поэтому, сначала в Калифорнии были приняты нормативные положения, касающиеся мониторинга систем ограничения токсичности отработавших газов и их компонентов. Эти нормы содержат расширенные и стандартизованные требования, предъявляемые к этому мониторингу.

OBD I (CARB)

В 1988 году вступила в силу первая ступень стандарта CARB (Калифорнийского совета по воздушным ресурсам) - OBD I. В отношении этой первой ступени систем OBD имеют место следующие требования:

- мониторинг электрических компонентов систем ограничения токсичности отработавших газов (на предмет коротких замыканий и обрывов цепей) и запись кодов неисправностей в памяти блока управления;
- наличие сигнальной лампы (MIL), извещающей водителя о неисправности;
- надпись «On-board» означает возможность определения на месте неисправного компонента (например, по коду, обозначающемуся миганием сигнальной лампы).

OBD II (CARB)

В 1994 году вступила в силу вторая ступень стандарта CARB - OBD II. С 1996 года требования OBD II стали обязательными для автомобилей с дизельными двигателями. В дополнение к требованиям ступени OBD I они предписывают мониторинг функций системы (например, проверку допустимости величин сигналов датчиков).

OBD II предписывает мониторинг всех систем и компонентов, относящихся к системам ограничения токсичности отработавших газов, если их неисправность вызывает увеличение токсичности. Кроме того, эти нормы требуют мониторинга всех компонентов, используемых для мониторинга компонентов систем ограничения токсичности отработавших газов, или компонентов, влияющих на результаты диагностики. Как правило, диагностика всех контролируемых компонентов и систем должна выполняться как минимум один раз во время цикла испытаний на токсичность отработавших газов (например, цикла испытаний FTP 75).

Нормы OBD II предписывают стандартизацию информации, записываемой в память неисправностей и доступа к этой информации (разъемы, методы связи) в соответствии со стандартом ISO 15031 [1] и соответствующими стандартами SAE (Общества автомобильных инженеров США). Это позволяет считывать данные, записанные в памяти, при помощи стандартизованных тестеров (сканирующих приборов).

Расширение требований OBD II

Начиная с 2004 модельного года:

Со времени вступления в силу норм OBD II они несколько раз пересматривались. Начиная с 2004 модельного года, введены в действие новые нормы CARB-OBD II, которые, кроме более строгих и дополнительных функциональных требований, также содержат требование контроля частоты диагностики в процессе повседневной эксплуатации, начиная с 2005 года («показатель постоянного мониторинга»).

Начиная с 2007 года и до конца 2013 года:

Требования последней редакции применяются к автомобилям, выпущенным с начала 2007 модельного года. Дополнительные требования к бензиновым двигателям в основном заключаются в контроле состава смеси, поступающей в отдельные цилиндры (на предмет нарушения соотношения воздух/топливо), расширении требования к диагностике процесса холодного пуска двигателя и постоянного хранения информации об ошибках/неисправностях, что также относится к автомобилям с дизельными двигателями.

Для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей с дизельными двигателями новые, более строгие требования в отношении предельно допустимых концентраций токсичных веществ в отработавших газах вводятся в действие в три этапа: до 2009 модельного года, с 2010 по 2012 модельный год и начиная с 2013 модельного года. Значительно расширены требования в отношении систем впрыска топлива, воздухозабора и системы очистки отработавших газов. Например, теперь требуется контролировать количество впрыскиваемого топлива и синхронизацию впрыска. В отношении системы воздухозабора требуется контролировать давление наддува, а также динамические характеристики систем рециркуляции отработавших газов и регулирования давления наддува. В отношении системы очистки отработавших газов требуются новые функции мониторинга каталитического нейтрализатора окислительного типа, сажевого фильтра, каталитического нейтрализатора оксидов азота аккумуляторного типа и системы дозирования SCR (селективное каталитическое восстановление) с каталитическим нейтрализатором NO_x аккумуляторного типа и системы дозирования SCR с каталитическим нейтрализатором SCR. Например, требуется контроль частоты регенерации сажевого фильтра и дозирования реагента-восстановителя NO_x (добавка AdBlue) в системе дозирования SCR.

В настоящее время законодательство пересматривается снова. Первый проект новой редакции для автомобилей с дизельными двигателями был опубликован в апреле 2009 года. Одно из новых требований заключается в том, что кроме регуляторов, мониторингу подлежат контролируемые функции, там где они касаются системы очистки отработавших газов. Также введены дополнительные требования в отношении мониторинга функций, относящихся к пуску холодного двигателя

Также рассматривается целесообразность ввода дополнительных требований OBD к мониторингу содержания в отработавших газах углекислого газа (CO_2). Также ожидается уточнение требований в отношении гибридных автомобилей. Поэтапный ввод в действие этих новых требования ожидается с начала 2012 модельного года.

Сегодняшний стандарт CARB OBD II для Калифорнии в настоящее время действует еще в одиннадцати штатах США. Остальные штаты планируют принять этот стандарт в ближайшем будущем.

Представленные ранее нормы OBD, предусмотренные стандартами CARB и EPA, относятся ко всем легковым автомобилям с количеством мест не более 12, а также к малотоннажным грузовым автомобилям с массой до 14 000 фунтов (6,35 т). Начиная с 2007 модельного года, требования к большегрузных грузовых автомобилям определяются нормами EMD (диагностика двигателя производителем). Требования EMD менее всеобъемлющи по сравнению с OBD. Начиная с 2010 модельного года, на большегрузные грузовые автомобили распространяются требования, аналогичные предъявляемым к легковым автомобилям (см. «Требования OBD к большегрузным грузовым автомобилям»).

OBD (EPA)

Законодательство EPA (Агентство по защите окружающей среды (США)) вступило в силу в оставшихся 38 штатах с 1994 года. Требования данного стандарта в основном аналогичны требованиям стандарта CARB (OBD II). Сертификат CARB будет признаваться EPA.

EOBD (EC)

Требования к системам бортовой диагностики для европейских стран имеют обозначение EOBD и разработаны на основе законодательства EPA-OBD. Нормы EOBD для легковых автомобилей с количеством мест до 9 и малотоннажных грузовых автомобилей полной массой до 3,5 т действуют с января 2000 года. Нормы для легковых автомобилей и малотоннажных грузовых автомобилей с дизельными двигателями действуют с 2003 года, а для большегрузных грузовых автомобилей с 2005 года (см. «Требования OBD к большегрузным грузовым автомобилям»).

В 2007/08 годах в рамках новых норм Евро-5 и Евро-6 были введены в действие новые требования EOBD к легковым автомобилям с бензиновыми и дизельными двигателями (нормы Евро-5 действуют с сентября 2009 года; Нормы Евро-6 планируется ввести в действие с сентября 2014 года)

Общие новые требования к легковым автомобилям с бензиновыми и дизельными двигателями в отношении периодичности диагностики в процессе повседневной эксплуатации в соответствии с законодательством CARB OBD (IUMPR, показатель постоянного мониторинга) действуют с момента вступления в силу норм Евро-5+ (с сентября 2011 года).

Для автомобилей с бензиновыми двигателями ввод в действие норм Евро-5 с сентября 2009 года в основном повлек за собой снижение предельно допустимых значений OBD. В дополнение к предельно допустимому содержанию в отработавших газах твердых частиц для бензиновых двигателей с прямым впрыском топлива был введен предел содержания NMHC (неметановые углеводороды (ранее HC)). Прямые функциональные требования к системе OBD заключаются в мониторинге трехкомпонентного каталитического нейтрализатора NMHC. Начиная с сентября 2011 года, введены в действие нормы Евро-5+ с неизменными по сравнению с Евро-5 пределами OBD. Существенным функциональным требованием к EOBD является мониторинг трехкомпонентного каталитического нейтрализатора NO_x. С сентября 2014 года, с вводом в действие норм Евро-6, ожидается дальнейшее значительное снижение предельно допустимых значений вредных веществ для OBD.

Для легковых автомобилей с дизельными двигателями ввод в действие норм Евро-5 повлек за собой снижение предельно допустимого содержания в отработавших газах твердых частиц, CO и NO_x.

Кроме того, вводятся дополнительные требования к мониторингу системы рециркуляции отработавших газов (охладителя) и, прежде всего, компонентов системы очистки отработавших газов. Здесь очень строгие требования предъявляются к мониторингу системы SCR DeNOx (селективное каталитическое восстановление и каталитический нейтрализатор). Функциональный мониторинг сажевого фильтра является обязательным независимо от количества неочищенных выбросов. Также требуется мониторинг каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа.

С вводом в действие норм Евро-6 в сентябре 2014 года пределы OBD будут значительно снижены. В отношении содержания твердых частиц предложение комиссии ЕС предполагает даже более строгие пределы OBD, чем в США. Будет введен предел OBD, касающийся количества твердых частиц. Окончательное определение пределов OBD для норм Евро-6 произошло в конце 2010 года.

Другие страны

Некоторые страны уже приняли пределы OBD, установленные в ЕС США, или планируют их принять (например, Китай, Россия, Южная Корея, Индия).

Требования к системе OBD

Блок управления двигателем должен контролировать все бортовые системы и компоненты, неисправность которых может вызвать увеличение содержания в отработавших газах токсичных

Таблица 1. Предельные концентрации токсичных веществ в отработавших газах для систем OBD

	Легковые автомобили с бензиновыми двигателями	Легковые автомобили с дизельными двигателями	Грузовые автомобили с дизельными двигателями
CARB	– Относительные пределы – В основном 1,5 × предел для соответствующей категории токсичности отработавших газов	– Относительные пределы – Целевые значения для 2013 года в основном от 1,5 до 1,75 × предел для соответствующей категории токсичности отработавших газов, но в течение 2007–2013 годов введение в три этапа более строгих пределов, например, для сажевого фильтра: 2007–2009: 5 × предельное значение, 2010–2012: 4 × предельное значение, с 2013 года: 1,75 × предельное значение	2010–2012 CO: 2,5 × предельное значение NMHC: 2,5 × предельное значение NO_x: +0,4 г/л.с·ч [3] Твердые частицы: +0,06 г/л.с·ч С 2013 года CO: 2,0 × предельное значение NMHC: 2,0 × предельное значение NO_x: +0,2 г/л.с·ч[3] Твердые частицы: +0,02 г/л.с·ч
EPA (Федеральные нормы США)	– Относительные пределы – В основном 1,5 × предельное значение для соответствующей категории токсичности отработавших газов	– Относительные пределы – В основном 1,5 × предельное значение для соответствующей категории токсичности отработавших газов	2010–2012: CO: 2,5 × предельное значение NMHC: 2,5 × предельное значение NO_x: +0,6 г/л.с·ч [3] Твердые частицы: +0,04 г/л·с·ч С 2013 года: CO: 2,0 × предельное значение NMHC: 2,0 × предельное значение NO_x: +0,3 г/л.с·ч [3] Твердые частицы: +0,04 г/л.с·ч
EOBD	Евро-5 (09/2009): CO: 1900 мг/км NMHC: 300 мг/км NO_x: 300 мг/км Твердые частицы: 50 мг/км [1] Евро-6 (09/2014): [2] CO: 1500 мг/км NMHC: 100 мг/км NO_x: 90 мг/км Твердые частицы: 9 мг/км [1]	Евро-5 (09/2009): CO: 1900 мг/км NMHC: 320 мг/км NO_x: 540 мг/км Твердые частицы: 50 мг/км Евро-6, промежуточные значения (с 09/2009): CO: 1900 мг/км NMHC: 320 мг/км NO_x: 240 мг/км Твердые частицы: 50 мг/км Евро-6 (09/2014): [2] CO: 750 мг/км NMHC: 140 мг/км NO_x: 140 мг/км Твердые частицы: 9 мг/км PN [4]: 1,2 1012 км$^{-1}$	Евро-4 (с 10/2005), Евро-5 (с 10/2008): NO_x: 7,0 г/кВт·ч Твердые частицы: 0,1 г/кВт·ч Мониторинг системы ограничения NO_x (с 11/2006): Предел NO_x + 1,5 г/кВт·ч Евро-4: (3,5 + 1,5) г/кВт·ч Евро-5: (2,0 + 1,5) г/кВт·ч Предложенные значения для Евро-6 с 2013 года: NO_x: 1,5 г/кВт·ч Твердые частицы: 0,04 г/кВт·ч Предложенные значения для Евро-6 с 2016 года: NO_x: 1,2 г/кВт·ч Твердые частицы: 0,025 г/кВт·ч

[1] Для бензиновых двигателей с прямым впрыском топлива

[2] Предложение комиссии ЕС, окончательное определение намечено на конец 2010 года.

[3] г/л·с·ч: грамм на «лошадиную силу эффективной мощности» за один час.

[4] Количество твердых частиц

веществ. В случае возникновения неисправности, вызывавшей превышение предельно допустимых концентраций токсичных веществ в отработавших газах, водитель должен быть уведомлен об этом при помощи лампы сигнализации неисправностей (MIL).

Нормы токсичности отработавших газов

Законодательство США OBD II (CARB и EPA) устанавливает пороговые значения, определенные на основе предельных концентраций токсичных веществ. При этом для различных категорий токсичности установлены различные предельные значения, применяемые во время сертификации автомобиля (например, Tier II, «корзина» 5, LEV 2). Нормы EOBD основаны на абсолютных значениях (см. табл. 1).

Функциональные требования

В рамках системы бортовой диагностики (OBD), в соответствии с требованиями законодательства, должен проводиться мониторинг всех систем и компонентов, относящихся к очистке отработавших газов, на предмет неисправностей и превышения предельно допустимых концентраций токсичных веществ.

Законодательство требует проведения мониторинга электрических функций (на предмет коротких замыканий и обрывов), проверки достоверности сигналов датчиков и мониторинга исполнительных устройств.

Тип диагностики определяется концентрацией загрязняющих веществ, ожидаемой в случае выхода из строя того или иного компонента (может быть измерена в процессе цикла диагностики), и режимом мониторинга. Простой функциональный тест («черно-белый тест») служит только для проверки работоспособности системы или компонента (например, открытие или закрытие заслонки вихревых каналов). Расширенный функциональный тест дает более детальную информацию о состоянии системы, а также при необходимости определяет влияние неисправности компонента на токсичность выбросов. В результате теста должны быть определены пределы адаптации функций впрыска топлива (например, калибровки нулевой подачи топлива для дизельного двигателя или адаптации коэффициента избытка воздуха λ для бензинового двигателя).

Сложность систем диагностики постоянно возрастала по мере ужесточения требований норм контроля токсичности отработавших газов.

Сигнальный индикатор неисправностей

Сигнальный индикатор неисправностей (MIL) информирует водителя о неисправности того или иного компонента. Законодательства CARB и EPA требуют, чтобы индикатор MIL загорался не позже, чем по окончании одного цикла движения после обнаружения неисправности. В регионах действия норм EOBD индикатор MIL должен загораться не позднее, чем по окончании третьего цикла движения после обнаружения неисправности.

Если неисправность исчезнет (например, после восстановления ослабшего контакта), она остается записанной в памяти неисправностей в течение 40 поездок («циклов прогрева»). Индикатор MIL гаснет после трех циклов движения без неисправности. На автомобиле с бензиновым двигателем индикатор MIL мигает, если неисправность может привести к повреждению каталитического нейтрализатора (отсутствие догорания).

Связь со сканирующим прибором

Протоколы связи для легковых автомобилей, используемые для интерфейса диагностики, в настоящее время разрешается использовать также для систем OBD. Однако, начиная с 2008 года для CARB и с 2014 года для ЕС, связь должна будет осуществляться только по шине CAN.

Ремонт автомобилей

Любой сервисный центр может использовать сканирующий прибор для считывания данных о неисправностях с блока управления. Это позволяет выполнять ремонт даже неофициальным сервисным центрам.

Чтобы ремонт мог производиться квалифицированно, производители обязаны за разумную плату предоставлять требуемые инструменты и информацию (руководства по ремонту в Интернете).

Условия включения

Диагностические функции выполняются только в том случае, если выполнены условия включения. Эти условия могут включать, например, пороговые значения крутящего момента, температуры двигателя и частоты вращения коленчатого вала.

Условия блокировки

Диагностические функции и функции двигателя не всегда могут выполняться одновременно. Имеют место условия блокировки, в соответствии с которыми выполнение некоторых функций запрещается. Например, на автомобиле с бензиновым двигателем система вентиляции топливного бака (система улавливания паров топлива) не может работать, пока выполняется диагностика каталитического

нейтрализатора. На автомобиле с дизельным двигателем мониторинг нагревательного расходомера воздуха может осуществляться только при закрытом клапане системы рециркуляции отработавших газов.

Временное прерывание диагностических функций

Во избежание ложных результатов диагностические функции при некоторых условиях могут отключаться. Примерами таких условий являются высокое разрежение (низкое давление воздуха), низкая температура наружного воздуха во время пуска двигателя или низкое напряжение аккумуляторной батареи.

Коды готовности

При проверке памяти неисправностей важно знать, что диагностические функции были выполнены, как минимум, один раз. Это можно проверить путем считывания кодов готовности. Эти коды готовности установлены для каждого компонента, подлежащего мониторингу в соответствии с требованиями законодательства.

Отзыв автомобилей

Если автомобили не отвечают требованиям OBD, власти могут потребовать от производителя начать кампанию отзыва автомобилей за его счет.

Управление системой диагностики

Как правило, диагностика всех контролируемых компонентов и систем должна выполняться во время движения и как минимум один раз во время цикла испытаний на токсичность отработавших газов (например, цикла испытаний FTP 75). Система управления диагностикой (DSM) может изменять последовательность выполнения диагностических функций в зависимости от условий движения. Целью является обеспечение достаточно частого выполнения диагностики в процессе повседневной эксплуатации. Система управления диагностикой включает следующие компоненты:

- управление путем сохранения кодов неисправностей и сопутствующих их возникновению окружающих условий в памяти («стоп-кадры»);
- распределитель диагностических функций для координации функций систем диагностики и управления двигателем;
- диагностический валидатор для определения, являются неисправности первичными или вторичными (следствием иной неисправности).

Функции систем OBD

Обзор

В то время как нормы EOBD содержат детальные требования к мониторингу отдельных компонентов, требования законодательства CARB OBD II детализированы в значительно большей степени. Ниже перечислены действующие в настоящее время (начиная с 2010 модельного года) требования законодательства CARB в отношении автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями. Требования, также детально описанные в стандартах EOBD, обозначены буквой (E):

Автомобили с бензиновыми и дизельными двигателями:

- рециркуляция отработавших газов (E);
- система снижения токсичности отработавших газов во время пуска холодного двигателя;
- система вентиляции картера;
- пропуски зажигания (E, только для автомобилей с бензиновыми двигателями);
- топливная система;
- регулируемые клапанные механизмы (в настоящее время только на автомобилях с бензиновыми двигателями);
- датчики системы снижения токсичности отработавших газов (кислородные датчики λ (E), датчики концентрации NO_x (E), датчики концентрации твердых частиц);
- система охлаждения двигателя;
- прочие компоненты (E);
- прочие системы и компоненты, влияющие на токсичность отработавших газов (E).

Только для автомобилей с бензиновыми двигателями:

- система подачи дополнительных порций воздуха;
- трехкомпонентный каталитический нейтрализатор (E), нагреваемый каталитический нейтрализатор;
- система улавливания паров топлива (диагностика герметичности топливного бака (E) с, как минимум, электрическим тестированием клапана продувки угольного фильтра);
- система кондиционирования воздуха (в случае, если она оказывает влияние на токсичность отработавших газов или OBD);
- система снижения концентрации озона.

Только для автомобилей с дизельными двигателями:
- каталитический нейтрализатор окислительного типа (Е);
- система SCR DeNOx (Е);
- каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа (Е);
- сажевый фильтр (Е);
- система впрыска топлива (количество впрыскиваемого топлива и синхронизация впрыска);
- охладитель системы рециркуляции отработавших газов(Е);
- система регулирования давления наддува;
- промежуточный охладитель.

Понятие «прочие системы и компоненты, влияющие на токсичность отработавших газов» относится к компонентам и системам, не указанным в этом перечне, но которые, в случае их неисправности, могут вызвать превышение пределов OBD или блокировку других диагностических функций.

Примеры функций системы OBD

Диагностика каталитического нейтрализатора

На автомобиле с бензиновым двигателем:

Эта функция диагностики контролирует эффективность трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Она определяется способностью каталитического нейтрализатора к удержанию кислорода. Мониторинг осуществляется посредством оценки изменения сигналов кислородных датчиков (λ-датчиков) в ответ на изменение значения уставки в замкнутой системе регулирования коэффициента избытка воздуха λ.

В отношении каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа требуется оценка способности к накоплению NO_x (показатель качества каталитического нейтрализатора). Для этой цели фактически накопленное количество NO_x, определяемое по количеству потребленного во время регенерации каталитического нейтрализатора реагента-восстановителя, сравнивается с ожидаемым количеством.

На автомобиле с дизельным двигателем:

На автомобиле с дизельным двигателем, оксид углерода (CO) и несгоревшие углеводороды (HC) окисляются в каталитическом нейтрализаторе окислительного типа (минимизация загрязнений). Диагностика каталитического нейтрализатора окислительного типа осуществляется путем оценки разности температур отработавших газов до каталитического нейтрализатора и после него (экзотермическая реакция).

Контролю подлежат накопительная и регенерационная способности каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа. Функции мониторинга основаны на моделях загрузки и регенерации, а также оценке измеренной продолжительности регенерации. Это требует наличия кислородного датчика или датчика концентрации NO_x.

Мониторинг каталитического нейтрализатора SCR DeNOx осуществляется посредством диагностики эффективности. Для этого требуются датчики NO_x перед каталитическим нейтрализатором и после него. Мониторинг компонентов системы дозирования реагента-восстановителя осуществляется отдельно.

Диагностика герметичности топливной системы

На автомобиле с бензиновым двигателем:

В процессе диагностики определяется наличие испарения топлива из топливной системы, которое может вызвать, в частности, увеличение содержания HC в отработавших газах. EOBD ограничивается проверкой целостности электрической цепи датчика давления паров в топливном баке и клапана продувки угольного фильтра (системы улавливания паров топлива). В США, с другой стороны, должна быть обеспечена возможность определения утечек из топливной системы. Это можно сделать двумя различными способами.

Метод низкого давления заключается в контроле давления паров топлива в топливном баке и приведении в действие обратных клапанов системы вентиляции топливного бака и продувки угольного фильтра. Вывод о наличии или отсутствии утечки можно сделать, исходя из изменения во времени давления паров в топливном баке.

Метод избыточного давления связан с использованием диагностического модуля с встроенным электрическим насосом для создания избыточного давления в топливном баке. Если бак герметичен, имеет место высокая скорость повышения давления. Вывод о наличии или отсутствии утечки можно сделать путем оценки скорости повышения давления.

Диагностика сажевого фильтра

На автомобиле с дизельным двигателем:

В настоящее время осуществляется контроль состояния сажевого фильтра на предмет поломки, снятия или засорения. Для этого используется датчик дифференциального давления (перепада давления на фильтре) при

определенном объемном расходе отработавших газов. Измеренное значение может быть использовано для оценки состояния фильтра.

Для мониторинга эффективности сажевого фильтра используется расширенная функция диагностики.

Начиная с 2010 модельного года, также подлежит контролю частота регенерации сажевого фильтра.

Диагностика системы рециркуляции отработавших газов

На автомобиле с дизельным двигателем:

В системе рециркуляции отработавших газов мониторингу подлежат регулятор, клапан, охладитель отработавших газов и иные отдельные компоненты.

Функциональный мониторинг системы осуществляется регуляторами массового расхода воздуха и контроллерами положения. Они контролируют постоянные изменения параметров системы. Система диагностики должна определять чрезмерно высокий или низкий поток рециркулирующих отработавших газов. Мониторингу также подлежат реакции системы.

Сама система рециркуляции отработавших газов контролируется на предмет ее электрической и функциональной работоспособности.

Мониторинг охладителя системы EGR осуществляется посредством дополнительного измерения температуры на выходе охладителя и ее сравнения со значениями, заложенными в модели. Это позволяет определить эффективность охладителя.

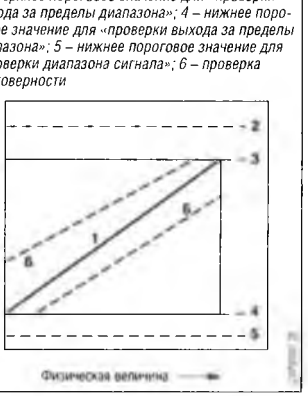
Прочие компоненты

Система бортовой диагностики требует мониторинга всех датчиков (например, датчиков массового расхода воздуха, скорости и температуры) и исполнительных устройств (например, дроссельной заслонки, топливного насоса высокого давления и свечей предпускового подогрева), оказывающих влияние на токсичность отработавших газов, или используемых для мониторинга других компонентов или систем (которые, следовательно, могут помешать их диагностике).

Датчики используются для мониторинга следующих неисправностей (см. рис. 1):

- электрические неисправности, т.е. короткие замыкания или обрывы электрических цепей («проверка диапазона сигнала»);
- выход за пределы допустимого диапазона («проверка выхода за пределы диапазона»), т.е выход напряжения сигналов датчиков за пределы физического диапазона измерений;
- неисправности, связанные с достоверностью сигналов («проверка достоверности»); это неисправности, связанные со свойствами самих компонентов (например, с дрейфом), или вызванные, например, шунтированием. Мониторинг осуществляется посредством проверки достоверности сигналов датчиков, либо с использованием модели, либо путем прямого сравнения с другими датчиками.

Рис. 1. Мониторинг датчиков:
1 – характеристика датчика; 2 – верхнее пороговое значение для «проверки диапазона сигнала», 3 – верхнее пороговое значение для «проверки выхода за пределы диапазона»; 4 – нижнее пороговое значение для «проверки выхода за пределы диапазона»; 5 – нижнее пороговое значение для «проверки диапазона сигнала»; 6 – проверка достоверности



Мониторинг исполнительных устройств должен осуществляться на предмет электрических неисправностей и, если это технически возможно, на предмет функционирования. Функциональный мониторинг означает, что при поступлении управляющей команды ее выполнение контролируется посредством наблюдения или измерения (например, при помощи датчика положения) реакции системы подходящим способом.

Исполнительные устройства, подлежащие мониторингу, включают все выходные ступени, дроссельную заслонку, клапан системы рециркуляции отработавших газов, механизм системы изменяемой геометрии турбины турбокомпрессора, завихряющую заслонку, инжекторы, свечи предпускового подогрева (на автомобилях с дизельными двигателями), систему вентиляции топливного бака (на автомобилях с бензиновыми двигателями) и обратный клапан угольного фильтра (на автомобилях с бензиновыми двигателями)

Требования к системам OBD большегрузных грузовых автомобилей

Европа

Для грузовых автомобилей первая ступень бортовой диагностики была введена в нормы ЕС (EOBD) одновременно с вступлением в силу норм Евро-4 (октябрь 2005 года), а вторая ступень – с вступлением в силу норм Евро-5 (октябрь 2008 года). Новые нормы OBD будут введены в действие с вступлением в силу норм Евро-6 в 2013 году.

Требования к мониторингу для Ступени 1:

- система впрыска топлива: мониторинг электрических неисправностей и общих отказов;
- компоненты двигателя: мониторинг компонентов систем ограничения токсичности отработавших газов на предмет превышения пределов OBD;
- системы очистки отработавших газов: мониторинг серьезных неисправностей.

Дополнительные требования Ступени 2:

- системы очистки отработавших газов: мониторинг соответствия пределам OBD.

Дополнительные требования

Мониторинг работы систем снижения концентрации NO_x (с ноября 2006 года). Системы контролируются на предмет соответствия их собственным предельно допустимым значениям количества выбросов, которые являются более строгими, чем пределы OBD.

Системы дозирования SCR:
Целью является обеспечение подачи реагента-восстановителя (водного раствора мочевины). Наличие реагента должно контролироваться по его уровню в бачке. Для проверки качества реагента необходимо контролировать содержания NO_x в отработавших газах при помощи датчика концентрации или датчика качества. В последнем случае также необходимо контролировать расход реагента-восстановителя.

Системы рециркуляции отработавших газов:
Мониторинг массового расхода рециркулирующих газов и деактивации рециркуляции отработавших газов.

Каталитические нейтрализаторы NO_x аккумуляторного типа:
Мониторинг содержания NO_x при помощи датчиков концентрации.

Мониторинга систем снижения содержания NO_x в отработавших газах:
Сохранение данных о неисправностях систем снижения содержания NO_x в энергонезависимой памяти в течение 400 дней (9 600 часов). В случае превышения предельно допустимого содержания NO_x или опорожнения бачка с раствором мочевины необходимо ограничить выходную мощность двигателя.

Нормы Евро-6

Нормы 6 в настоящее время находятся на стадии определения. Часть OBD будет разработана на основе глобальных технических норм (GTR) «Согласованного международного стандарта OBD» (WWH OBD). В отношении структуры нормы WWH OBD GTR соответствуют Калифорнийскому стандарту OBD (для малотоннажных грузовых автомобилей).

Нормы WWH OBD оставляют открытым вопрос о том, какие операции мониторинга должны быть выбраны в национальных нормах (в данном случае Евро-6) для реализации требований WWH OBD.

Пределы OBD и выбор испытательных циклов должны быть определены национальными нормами.

Специальные аспекты норм WWH OBD включают новые требования к сохранению данных о неисправностях и новый протокол связи со сканирующими приборами (ISO/DIS 27145 [3]).

Неисправности должны классифицироваться в соответствии с их серьезностью в отношении увеличения содержания токсичных веществ в отработавших газах. Неисправности, связанные с токсичностью отработавших газов могут различаться по поведению индикатора MIL и посредством связи со сканирующим прибором. Применяются следующие категории:

- A: количество выбросов выше предела OBD;
- B1: количество выбросов выше или ниже предела OBD;
- B2: количество выбросов ниже предела OBD, но выше предела количества выбросов;
- C: влияние на выбросы ниже предельно допустимого значения.

В соответствии с этим принципом выводятся все неисправности, связанные с увеличением токсичности отработавших газов, даже те,

которые оказывают на нее очень незначительное влияние.

Временные данные для Евро-6:
- вступают в силу с января 2013 года;
- предусматривают значительное снижение предельного содержания и пределов OBD в отношении NO_x и твердых частиц по сравнению с Евро-5;
- второй этап снижения пределов OBD назначен на январь 2016 года;
- предусматривается введение предельного содержания NH_3 и количества твердых частиц;
- использование гармонизированных испытательных циклов WHSC и WHTC,
- разрешение проверки соответствия системы требованиям в отношении токсичности отработавших газов в полевых условиях при помощи переносных измерительных устройств (PEMS);
- проверка частоты мониторинга OBD в процессе повседневной эксплуатации (повседневный мониторинг).

США

Законодательство CARB, начиная с 2007 модельного года

В Калифорнии «Диагностика изготовителя двигателя» (EMD) была введена для большегрузных грузовых автомобилей, начиная с 2007 модельного года. Это может рассматриваться как преддверие норм OBD. EMD требует мониторинга всех компонентов системы рециркуляции отработавших газов.

Требования не отражены в отдельных пределах содержания токсичных веществ. Какого-либо стандартизованного протокола связи со сканирующими приборами также не требуется.

2010 модельный год

Пользующийся наибольшим спросом вариант двигателя данного семейства должен быть оборудован системой OBD. На другие варианты этого семейства двигателей распространяется упрощенная процедура сертификации.

Требования к системам OBD грузовых автомобилей, начиная с 2010 модельного года, практически идентичны соответствующим требованиям законодательства CARB к легковым автомобилям, начиная с 2010 модельного года.

В техническом отношении требования следует рассматривать на том же уровне, что для легковых автомобилей. Различные требования обусловлены тем, что для грузовых автомобилей требуется сертификация двигателя. Таким образом, в ходе испытательных циклов двигателя определяются граничные условия, отличные от условий сертификации автомобиля.

2013 модельный год

Основной вариант двигателя того или иного семейства двигателей данного производителя должен быть оборудован системой OBD. Кроме того, в каждом случае для основного варианта двигателя в каждом семействе требуется наличие системы OBD. На другие основные варианты двигателей этих семейств распространяется упрощенная процедура сертификации.

Пределы OBD более строгие, чем для 2010 модельного года.

2016 модельный год

Все семейства двигателей данного изготовителя должны быть оборудованы системой OBD во всех основных вариантах.

Япония

С 2004 года Япония ввела в действие собственные нормы OBD для грузовых автомобилей. Требования сопоставимы с нормами EMD, принятыми в Калифорнии.

Другие страны

В то же время нормы OBD для грузовых автомобилей были введены также другими странами, включая Китай, Индию, Корею, Австралию, Бразилию и Россию. В этом отношении эти страны приняли или готовятся принять нормы ЕС (Евро-4 или Евро-5).

Список литературы

[1] ISO 15031: Road Behicles – Communicatior between Behicle and external equipment for emissions-related diagnostics.

[2] ISO 15765: Road vehicles – Diagnostics on Controller Area Networks (CAN).

[3] ISO/DIS 27145: Road vehicles – Implementation of WWH-OBD communication requirements – Part 1: General information and use case definition

Диагностика в мастерской

Назначение

Назначением диагностики в мастерской станции технического обслуживания является быстрое и надежное отыскание самого малого сменного дефектного устройства. Диагностика современных двигателей, как правило, выполняется с использованием компьютеризованного диагностического тестера. Во время диагностики в мастерской используются результаты диагностики во время движения (записи в памяти неисправностей) с использованием специальных диагностических модулей блока управления двигателем (ECU) или диагностического тестера и дополнительного испытательного и измерительного оборудования. Эти диагностические опции встроены в диагностический тестер и позволяют выполнять поиск и устранение неисправностей, руководствуясь соответствующими подсказками.

Поиск и устранение неисправностей

Главным элементом является процедура поиска и устранения неисправностей. Начиная с симптома или записи в памяти неисправностей, работник мастерской получает указания в соответствии с определяемой событиями последовательностью. Процедура поиска и устранения неисправностей связывает все опции диагностики в соответствии со специальной последовательностью. Сюда включены анализ симптомов (записей в памяти неисправностей), диагностические модули мастерской в ECU, диагностические модули в диагностическом тестере, испытательное оборудование и дополнительные датчики.

Все диагностические модули мастерской могут быть использованы только, когда диагностический тестер подключен, а автомобиль, как правило, неподвижен. Рабочие условия контролируются в ECU.

Анализ симптомов

Неисправность автомобиля может либо непосредственно ощущаться водителем, либо документироваться посредством записи в памяти неисправностей. В начале диагностики в мастерской сотрудник должен идентифицировать симптом, как отправную точку процедуры поиска и устранения неисправностей.

Чтение и удаление записей в памяти неисправностей

Все неисправности, возникающие во время движения, записываются в памяти неисправностей вместе с условиями, имевшими место на момент возникновения неисправности. Эти данные могут быть считаны с использованием протокола интерфейса, предусмотренного производителем автомобиля. Этот протокол разработан на основе действующих стандартов и обычно расширен для включения тех или иных компонентов данного изготовителя. При помощи диагностического тестера также можно удалять записи из памяти неисправностей.

Дополнительное испытательное оборудование и датчики

Опции диагностики могут быть расширены при помощи дополнительных датчиков (например, токовых клещей и датчика давления) или испытательного оборудования. В случае неисправности, определенной в мастерской, оборудование адаптируется к данному автомобилю. Оценка результатов измерений обычно осуществляется при помощи диагностического тестера.

Диагностические модули ECU

Диагностические модули, встроенные в ECU, после их запуска диагностическим тестером работают автономно и по завершении диагностики передают результат обратно на диагностический тестер. Отличие диагностических модулей ECU от простых тестов исполнительных устройств со звуковой сигнализацией заключается в том, что с их помощью можно диагностировать автомобиль в мастерской в определенных рабочих точках, приводить в действие те или иные исполнительные устройства и независимо оценивать результаты по значениям сигналов датчиков с использованием логической схемы устройства оценки. Примерами таких модулей являются тест высокого давления, используемый в качестве системного теста системы впрыска топлива на дизельном двигателе (рис. 1), и тест топливных форсунок дизельного двигателя (рис. 2).

Предусмотрена возможность параметризации диагностических модулей при помощи диагностического тестера, что позволяет адаптировать процедуру диагностики даже после выпуска автомобиля на рынок.

Диагностические модули мастерской

Функциональная последовательность диагностики и оценка выполняются при помощи диагностических модулей тестера посредством считывания сигналов датчиков автомобиля или дополнительных датчиков. Примером такого модуля может служить диагностический

тест клапана системы рециркуляции отработавших газов.

Динамические испытательные модули отличаются чрезвычайной гибкостью, поскольку их структура может изменяться посредством ввода исходных данных с диагностического тестера.

Рис. 1. Проверка высокого давления в системе впрыска топлива дизельного двигателя:
Определение утечек в системе высокого давления и эффективности генерации высокого давления
Шаги:
начало теста – увеличение уставки давления – измерение времени возрастания давления – уменьшение уставки давления – измерение времени снижения давления – изменение частоты вращения коленчатого вала и давления – измерение времени снижения давления при остановке двигателя по окончании испытаний – результаты диагностики

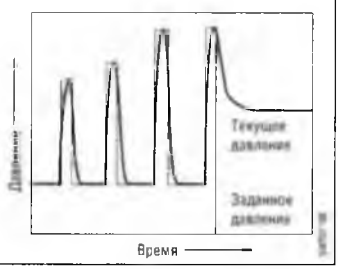
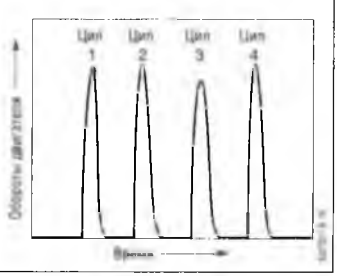


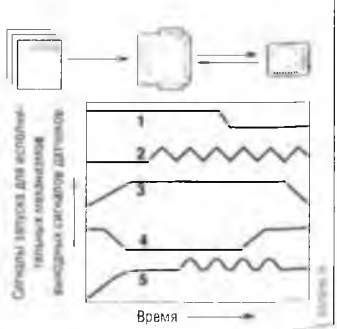
Рис. 2. Тестирование топливных форсунок дизельного двигателя
Определение разброса количества топлива, впрыскиваемого отдельными форсунками
Шаги:
начало испытаний – отсечка подачи топлива в отдельный цилиндр – скачок количества топлива – измерение максимальной скорости – повторение для следующих цилиндров – результат диагностики



Такие диагностические модули позволяют, например, выполнять «разгон» исполнительных устройств, деактивацию корректирующих функций, деактивацию впрысков топлива и сохранение в буфере и чтение значений сигналов датчиков (см. рис. 3). Диагностические модули хранятся в памяти ECU. Координация и временное согласование отдельных модулей осуществляются в ECU «координатором тестов». Результаты измерений (значения сигналов датчиков) могут выводиться в режиме реального времени или записываться в буфере диагностического тестера для последующей оценки.

Динамические испытательные модули дают производителям автомобилей возможность адаптировать диагностические тесты к изменениям граничных условий даже после выпуска автомобиля на рынок, поскольку новые диагностические тесты могут быть сделаны доступными для мастерских в рамках обычного периодического обновления программного обеспечения.

Рис. 3. Принцип действия динамических испытательных модулей
Гибкая конфигурация функциональных последовательностей
Шаги
выбор и параметризация испытательных модулей – сохранение кофигурации в тестере – начало испытания, передача параметров на ECU – выполнение последовательности в ECU – передача результатов на тестер – оценка результатов в тестере;
1, 2, 3 – активация исполнительных устройств, 4, 5 – выходные сигналы датчиков



Диагностические функции ECU и информационная система

Диагностика неисправностей и ремонт

Диагностические тестеры Bosch серии KTS (малогабаритные диагностические тестеры) и программное обеспечение ESI[tronic] позволяют выполнять на автомобилях всеобъемлющий поиск и устранение неисправностей (диагностику). Информационная система (SIS) является важной частью программного обеспечения ESI[tronic] и способствует быстрой и точной диагностике.

ESI[tronic] предлагает различные типы систем SIS. Наиболее широко используемым из них являются инструкции по поиску неисправностей. Эти инструкции предоставляют технику мастерской или станции технического обслуживания крайне важную информацию, необходимую для диагностики сложных проблем в различных электронных системах автомобиля и устранения неисправностей.

Доступ к тому или иному тесту предоставляется после ввода кодового номера автомобиля (в различных странах используются свои обозначения, например, в Германии – кодовые обозначения KBA), или точного типа автомобиля. После этого отображаются все имеющиеся в системе SIS инструкции по поиску неисправностей для данного автомобиля. Затем техник может выбрать нужную инструкцию, например по системе управления двигателем Motronic MED 9.5.10.

Если клиент описал симптомы неисправности, техник может вызвать процедуру поиска и устранения неисправностей на основе подсказок и получить перечень компонентов, которые он должен проверить, чтобы найти причину неисправности.

Техник также может считать содержимое памяти неисправностей при помощи диагностического тестера. Если в памяти записана одна или более неисправностей, через коды этих неисправностей техник получает доступ к процедурам проверки соответствующих компонентов.

Теперь он может использовать инструкции по проверке состояния компонентов. Все компоненты перечисляются со значениями уставок в системе диагностики. Далее техник выполняет проверку всех указанных компонентов. По окончании проверки он определяет, требуется ли замена того или иного компонента.

Инструкции по поиску неисправностей также включают описания функций, электрические схемы, схемы расположения компонентов, функции считывания фактических значений параметров и процедуры диагностики исполнительных устройств.

Информационная система SIS в программном обеспечении ESI[tronic] является полезным инструментом, позволяющим решать сложные проблемы поиска и устранения неисправностей автомобилей.

Системы управления двигателем с искровым зажиганием

Описание системы управления двигателем

Система управления двигателем обеспечивает передачу на двигатель с искровым зажиганием команд, отдаваемых водителем. Она управляет двигателем таким образом, чтобы двигатель обеспечивал требуемый уровень крутящего момента при минимальных возможных расходе топлива и токсичности отработавших газов.

Выходная мощность двигателя определяется крутящим моментом, передаваемым сцеплению и частотой вращения коленчатого вала. Крутящий момент на сцеплении – это момент, производимый за счет сгорания топлива минус момент трения (потери на трение в двигателе), момент потерь на газообмен и момент, необходимый для привода вспомогательных агрегатов (см. рис. 1). Крутящий момент на ведущих колесах равен моменту на входе сцепления за вычетом потерь в сцеплении и трансмиссии. Этому результирующему крутящему моменту противодействуют такие силы, как сопротивление качению шин и аэродинамическое сопротивление. В зависимости от команды водителя, между этими силами сопротивления и крутящим моментом может иметь место состояние либо равновесия, либо дисбаланса. В случае равновесия автомобиль движется с постоянной скоростью. В противном случае имеет место ускорение или замедление.

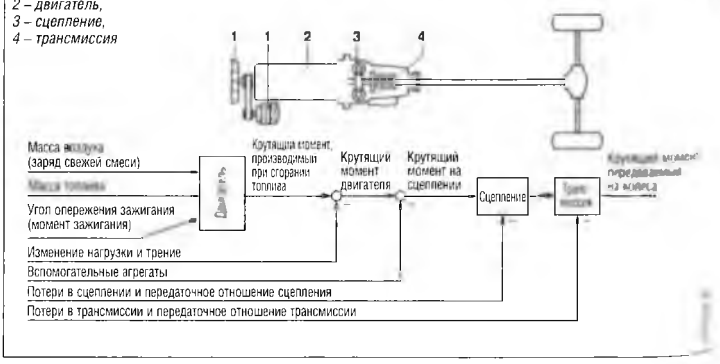
Крутящий момент, производимый двигателем, определяется в основном следующими переменными:

- массой воздуха, доступного для сжигания топлива после закрытия клапанов;
- массой топлива в цилиндре;
- моментом зажигания.

В меньшей степени оказывают влияние на крутящий момент также состав топливно-воздушной смеси (количество остаточных отработавших газов) или процессы сгорания топлива.

Основной функцией системы управления двигателем является координация работы различных подсистем с целью регулирования крутящего момента, производимого двигателем, с соблюдением требований к ограничению токсичности отработавших газов, расходу топлива, выходной мощности и уровню комфорта и безопасности. Система управления двигателем также выполняет диагностику различных подсистем.

Рис. 1. Распределение крутящего момента в силовой передаче:
1 – привод вспомогательных агрегатов (генератора, кондиционера, компрессора и т.п.);
2 – двигатель,
3 – сцепление,
4 – трансмиссия



Обзор системы

Обзор электрической системы

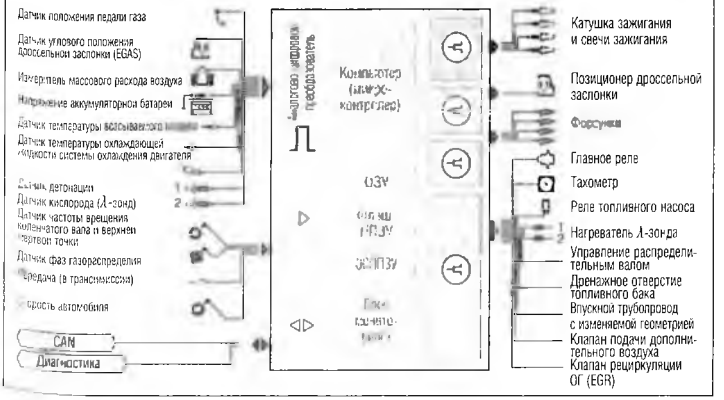
Системы управления Motronic фирмы Bosch предназначены для управления двигателем в режимах замкнутого или разомкнутого регулирования. Система Motronic (рис. 2) включает все датчики, необходимые для измерения значений параметров двигателя и автомобиля в целом, и исполнительные устройства, осуществляющие требуемое регулирование. Блок управления использует данные, поступающие с датчиков для определения состояния автомобиля и двигателя. Этот процесс выполняется с очень высокой частотой (с периодом в несколько миллисекунд для обеспечения регулирования в режиме реального времени). Во входных цепях происходит подавление помех и преобразование сигналов в электрическое напряжение с использованием единой унифицированной шкалы. Аналого-цифровой преобразователь затем преобразует отфильтрованные сигналы в цифровую форму. Другие сигналы принимаются через цифровые интерфейсы (например, шины CAN, FlexRay) или через интерфейсы широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Основным устройством блока управления двигателя является микропроцессор с программной памятью (например, флэш-ППЗУ), в которой хранятся все алгоритмы управления, т.е. алгоритмы математических вычислений, выполняемых в соответствии со специальными программами, и данные (параметры, характеристики, карты программ). Входные переменные, полученные в результате обработки сигналов датчиков, оказывают влияние на алгоритмы вычислений и, следовательно, на выходные сигналы, поступающие на исполнительные устройства. Исходя из этих входных сигналов, микропроцессор определяет требуемые реакции на команды водителя и вычисляет, например, необходимый крутящий момент, величину заряда топлива, поступающего в цилиндры, момент зажигания и подает соответствующие выходные сигналы на исполнительные устройства (например, системы контроля выделения паров топлива, турбокомпрессор и систему подачи дополнительного воздуха).

Сигналы низкого уровня, выходящие из микропроцессора, посредством задающего каскада усилителя мощности преобразуются в сигналы тех мощностей, которые требуются различным исполнительным устройствам.

Еще одной важной функцией системы Motronic является мониторинг работоспособности всех систем с использованием системы бортовой диагностики (OBD). В целях выполнения дополнительных требований, предъявляе-

Рис. 2. Компоненты, используемые для управления двигателем с искровым зажиганием в режимах разомкнутого или замкнутого регулирования



мых к системе Motronic нормативными положениями, примерно половины вычислительной мощности системы Motronic расходуется на выполнение задач, связанных с диагностикой.

Обзор функций системы

Система управления двигателем, кроме основных функций регулирования подачи топлива, смесеобразования и зажигания, выполняет большое количество вторичных функций. Для большей ясности система подразделяется на несколько подсистем. Полная структура системы Motronic показана на рис. 3.

Подсистема определения требуемого крутящего момента (TD)

Водитель выдает прямую команду управления посредством изменения положения педали акселератора. Положение педали акселератора преобразуется в значение уставки для системы определения требуемого крутящего момента.

Кроме прямого ввода команды водитель также может отдавать команды косвенным образом, используя систему круиз-контроля. Требуемый крутящий момент вычисляется, исходя из текущих условий движения.

Если педаль акселератора не нажата, система вычисляет крутящий момент, необходимый для поддержания оборотов холостого хода.

Функция демпфирования, электрическая система (стартер, генератор, аккумуляторная батарея) и другие электрические потребители, такие как система кондиционирования воздуха, предъявляют дополнительные требования в отношении крутящего момента.

Подсистема управления величиной крутящего момента (TS)

Переменное значение требуемого крутящего момента, определенное системой TD, потребности трансмиссии, потребности динамики движения и прочие потребности двигателя (например, нагрев каталитического нейтрализатора) координируются в подсистеме управления величиной крутящего момента. Результатом является определение общего требуемого крутящего момента двигателя внутреннего сгорания.

Исходя из значения общего крутящего момента, генерируются заданные значения объема заряда топлива, впрыска топлива и момента зажигания.

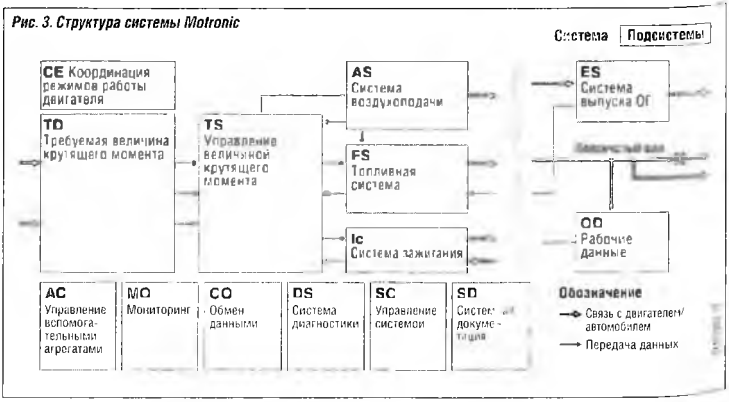
Объем заряда вводится как относительная масса воздуха. Относительная масса воздуха (стандартизованная для всех классов двигателей) представляет собой отношение фактической массы воздуха в цилиндре к максимально возможной массе воздуха при данной частоте вращения коленчатого вала.

Заданное значение момента зажигания описывается углом опережения зажигания.

Снижение крутящего момента может производиться посредством пропуска впрысков топлива (например, в соответствии с требованиями системы контроля тягового усилия). С этой целью определяется количество пропусков впрыска.

В системах с прямым впрыском топлива можно задать режимы работы на обедненной смеси (например, с послойным распределением заряда топлива в камере сгорания). В этих режимах работы также можно задать

Рис. 3. Структура системы Motronic



значение крутящего момента двигателя посредством ввода заданного значения коэффициента избытка воздуха λ.

Исходя из значений сигналов различных датчиков, физические модели генерируют требуемое фактическое значение крутящего момента на сцеплении. Это значение фактического крутящего момента используется для контроля системы Motronic, а также требуется для других систем, таких как системы управления трансмиссией.

Подсистема управления воздухоподачей (AS)
Относительное значение массы воздуха, введенное из подсистемы управления величиной крутящего момента, преобразуется в конкретное количество, требуемое для исполнительных устройств, используемых для регулирования количества подаваемой в цилиндры смеси.

Основным исполнительным устройством является дроссельная заслонка. Для вычисления угла открытия дроссельной заслонки, исходя из заданного значения массы воздуха, используются модели. В свою очередь, исходя из значения угла открытия, осуществляется управление приводом дроссельной заслонки с использованием широтно-импульсной модуляции.

Имеются подсистемы, в которых основным методом регулирования является активация впускных и выпускных клапанов. В таких системах дроссельная заслонка обычно остается постоянно открытой. Только в особых случаях (например, в аварийном режиме) дроссельная заслонка используется в качестве регулятора заряда смеси.

В случае двигателей с турбонаддувом также учитывается активация перепускной заслонки нагнетателя, приводимого в действие отработавшими газами, или управление нагнетателем с механическим приводом.

Еще одним видом исполнительных устройств являются системы регулирования положения распределительных валов и клапаны системы рециркуляции отработавших газов.

Кроме того, определяется фактическая текущая величина заряда смеси, подаваемого в цилиндры двигателя внутреннего сгорания. Для этой цели в качестве основных переменных используются сигналы датчиков температуры и давления во впускном трубопроводе.

Подсистема топливной системы (FS)
Функцией топливной системы является подача топлива из топливного бака в топливную магистраль в требуемом количестве и под предписанным давлением.

Используя текущее фактическое значение заряда смеси, давление топлива в топливной магистрали и впускном трубопроводе, и продолжительность открытия форсунок вычисляются, исходя из заданного значения λ.

В целях оптимизации состава топливно-воздушной смеси топливные форсунки активируются синхронно с углом поворота коленчатого вала.

Долгосрочная адаптация фактического значения λ обеспечивает повышение точности дозирования топлива.

Подсистема системы зажигания (IS)
Результирующий момент (угол) опережения зажигания вычисляется, исходя из заданного значения входного сигнала зажигания, условий работы двигателя и внешних воздействий (например, системы контроля детонации). Таким образом, искра генерируется на электродах свечи зажигания в требуемый момент.

Угол опережения зажигания устанавливается таким образом, чтобы двигатель работал с оптимальным расходом топлива. Подсистема отступает от этого принципа только в некоторых особых ситуациях (например, при нагреве каталитического нейтрализатора или быстром снижении крутящего момента во время переключения передач).

Система предотвращения детонации непрерывно контролирует процесс сгорания топлива в цилиндрах. Она обеспечивает работу двигателя с оптимальным расходом топлива, вблизи порога возникновения детонации. В то же время система позволяет избежать повреждений, обычно вызываемых детонацией. Система предупреждения детонации подлежит непрерывному мониторингу с тем, чтобы в случае неисправности момент опережения зажигания мог быть скорректирован надлежащим образом и установлен на достаточном расстоянии от порога возникновения детонации.

Подсистема системы выпуска отработавших газов (ES)
В этой подсистеме выполняется вычисление воздействий в замкнутой или разомкнутой системах регулирования, необходимых для обеспечения оптимальной работы трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Состав топливно-воздушной смеси должен регулироваться в узком диапазоне, вблизи стехиометрического соотношения воздух/топливо.

Подсистема также осуществляет мониторинг каталитического нейтрализатора. В качестве основы для этого мониторинга служат

сигналы датчиков системы выпуска отработавших газов (например, кислородного датчика).

Функция защиты компонентов предотвращает тепловую перегрузку системы выпуска отработавших газов. Фактические значения температур в системе выпуска отработавших газов, требуемые для этой цели, обычно моделируются.

В режиме работы на обедненной смеси с послойным распределением заряда топлива (в случае бензинового двигателя с прямым впрыском топлива) также регулируется состав топливно-воздушной смеси с целью обеспечения оптимальной работы каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа.

Подсистема координации режимов работы двигателя (CE)

В случае бензинового двигателя с прямым впрыском топлива подсистема координирует и переключает режимы работы двигателя (например, работа с гомогенной смесью или послойным распределением заряда топлива в камере сгорания). Для определения требуемого режима работы необходимо координировать потребности различных функций на основе определенных приоритетов.

Подсистема рабочих данных (OD)

Подсистема рабочих данных оценивает значения переменных величин, характеризующих состояние двигателя (например, частоты вращения коленчатого вала, температуры), выполняет цифровую обработку сигналов и проверку достоверности и делает результат доступным для других подсистем.

Адаптация допусков определения частоты вращения позволяет более точно регулировать впрыск топлива и момент зажигания.

Определяется необходимость в пропусках зажигания в качестве функции защиты каталитического нейтрализатора.

Подсистема управления вспомогательными агрегатами (AC)

В систему управления двигателем часто встраиваются такие дополнительные функции, как управление компрессором кондиционера воздуха, управление вентилятором или регулирование температуры двигателя. Эти функции координируются в подсистеме управления вспомогательными агрегатами.

Подсистема обмена данными (CO)

Электрическая сеть автомобиля содержит большое количество других систем (например, система управления трансмиссией или электронная система курсовой устойчивости), а также систему Motronic. Обмен данными между системами осуществляется через стандартизованные интерфейсы (например, по шине CAN).

Кроме того, сигналы из системы управления двигателем могут считываться диагностическими тестерами, при помощи которых также можно выполнять определенные настройки исполнительных устройств.

Подсистема системы диагностики (DS)

Работоспособность системы Motronic непрерывно контролируется подсистемой системой диагностики. Функции этой подсистемы диагностики включают проверку электрических цепей и проверку достоверности сигналов посредством сравнения сигналов датчиков с моделями. Неисправности сохраняются в памяти и надлежащим образом обрабатываются (например, им присваиваются «временные отметки») В дальнейшем все неисправности можно просмотреть при помощи диагностического тестера.

Некоторые диагностические функции доступны только при определенных граничных условиях (например, в определенных диапазонах температуры или нагрузки). Также существуют диагностические функции, которые должны выполняться в определенной последовательности. Координация этих последовательностей также осуществляется системой диагностики.

Подсистема мониторинга (MO)

Мониторингу подлежат электронные системы автомобиля. Основной функцией подсистемы является сравнение величин крутящего момента. При этом сравнивается величина допустимого крутящего момента, вычисляемая, исходя из величины задания, т.е. сигнала, выдаваемого водителем, с величиной фактического крутящего момента, вычисляемого, исходя из параметров двигателя

На следующих уровнях мониторингу подлежат ядро процессора и его периферийные устройства.

Подсистема управления системой (SC)

Подсистема осуществляет адаптацию системы Motronic. Перед вычислением отдельных функций необходимо обеспечить наличие соответствующих инфраструктур. Для оптимизации использования ресурсов («машинного времени») требуются различные алгоритмы вычислений (например, алгоритмы с синхронизацией по углу опережения зажигания или времени)

Определенные функции (например, функциональная диагностика выходных каскадов) выполняются перед пуском двигателя. Функция последовательного управления также управляет операциями сброса и повторного запуска электронного блока управления (ECU).

Подсистема системной документации (SD)
В дополнение к функциям замкнутого или разомкнутого регулирования, выполняемым системой Motronic, для детального описания конкретного проекта требуются многочисленные документы. Эти документы включают описания аппаратуры и программного обеспечения ECU, монтажные схемы, данные двигателя, описания компонентов и назначения контактов разъемов.

Версии системы Motronic

Первоначально система Motronic включала электронные системы управления впрыском топлива и зажигания, объединенные в одном блоке управления. В дальнейшем, в связи с постоянным ужесточением требований к ограничению токсичности отработавших газов, снижению расхода топлива и уровням комфорта и безопасности система постепенно приобретала все новые функции. Примерами этих дополнительных функций являются:
- регулирование частоты вращения коленчатого вала на холостом ходу;
- регулирование коэффициента избытка воздуха λ;
- управление системой улавливания паров топлива;
- управление системой рециркуляции отработавших газов с целью снижения содержания NO_x и расхода топлива;
- управление системой подачи дополнительного воздуха с целью снижения количества выбросов HC на стадиях пуска и прогрева двигателя;
- управление турбокомпрессором, приводимым в действие отработавшими газами и впускным трубопроводом с изменяемой геометрией с целью улучшения рабочих характеристик двигателя;
  регулирование положения распределительного вала с целью снижения токсичности отработавших газов и улучшения рабочих характеристик двигателя;
- защита компонентов (например, контроль детонации, ограничение частоты вращения коленчатого вала, регулирование температуры двигателя).

Система управления двигателем Motronic, со времени ее первого появления в 1979 году, подверглась существенным усовершенствованиям. В дополнение к электронным системам многоточечного впрыска топлива были разработаны следующие, более простые и экономичные системы, позволяющие использовать систему Motronic на автомобилях среднего класса и компактных автомобилях:
- система KE-Motronic на основе системы непрерывного впрыска топлива KE-Jetronic;
- система Mono-Motronic на основе системы одноточечного впрыска топлива Mono-Jetronic

В настоящее время на новых автомобилях устанавливаются только многоточечные системы впрыска топлива:
- система M-Motronic для управления зажиганием и впрыском топлива в системах впрыска топлива во впускной трубопровод с обычными дроссельными заслонками. Однако, эта система Motronic становится все менее популярной;
- система ME-Motronic с электронной системой управления дроссельной заслонкой (ETC) для управления впрыском топлива, зажиганием и воздухозабором для систем впрыска топлива во впускной трубопровод (см. рис. 4);
- система DI-Motronic (прямого впрыска топлива) с дополнительными функциями замкнутого или разомкнутого регулирования для систем прямого впрыска топлива высокого давления на бензиновых двигателях и реализации различных режимов работы двигателей этого типа (рис. 5);
- двухтопливная система Bifuel-Motronic, предназначенная для управления компонентами, необходимыми для работы двигателя на бензине или природном газа (см. главу «Двигатели, работающие на природном газе»).

Рис. 4. Система управления работой двигателя ME Motronic:

1 – угольный фильтр; 2 – датчик массового расхода воздуха со встроенным датчиком температуры; 3 – дроссельная заслонка (ETC); 4 – клапан продувки угольного фильтра; 5 – датчик давления во впускном трубопроводе, 6 – топливная рампа, 7 – топливная форсунка; 8 – исполнительные устройства и датчики для регулирования положения распределительного вала; 9 – катушка зажигания со свечой зажигания, 10 – датчик положения распределительного вала; 11 – кислородный датчик перед первичным каталитическим нейтрализатором; 12 – блок управления двигателем (ECU), 13 – клапан системы рециркуляции отработавших газов, 14 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 15 – датчик детонации, 16 – датчик температуры охлаждающей жидкости системы охлаждения двигателя; 17 – первичный каталитический нейтрализатор (трехкомпонентный); 18 – кислородный датчик после первичного каталитического нейтрализатора; 19 – интерфейс CAN, 20 – лампа сигнализации неисправностей;
21 – интерфейс системы диагностики;
22 – интерфейс блока управления иммобилайзером;
23 – педаль акселератора с датчиком положения педали;
24 – топливный бак;
25 – встроенный в бак модуль с топливным насосом, топливным фильтром и регулятором давления топлива;
26 – главный каталитический нейтрализатор (трехкомплнентный)

Показанная на рисунке система диагностики отвечает требованиям EOBD

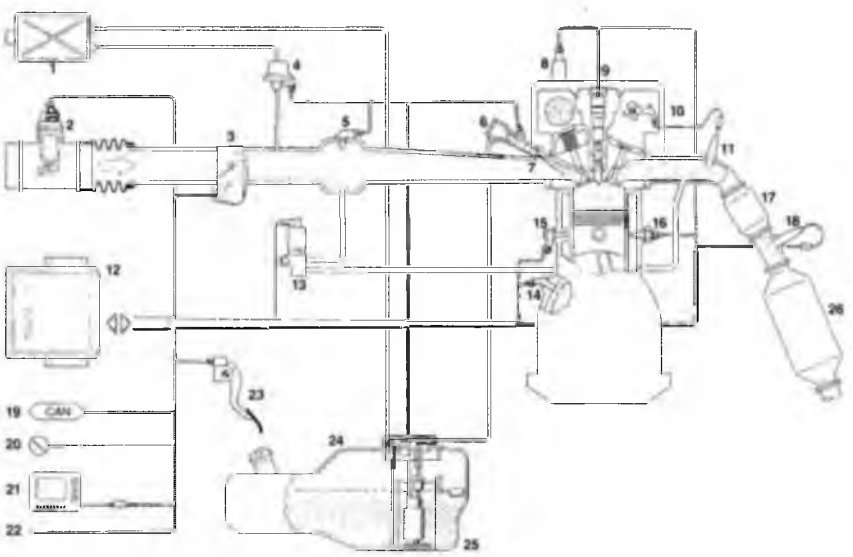


Рис. 5 Схема системы DI-Motronic:

1 – угольный фильтр; 2 – клапан продувки угольного фильтра; 3 – насос высокого давления с встроенным клапаном регулирования подачи топлива, 4 – исполнительные устройства и датчики для регулирования положения распределительного вала; 5 – катушка зажигания со свечой зажигания; 6 – датчик массового расхода воздуха с встроенным датчиком температуры; 7 – дроссельная заслонка (ETC); 8 – датчик давления во впускном трубопроводе; 9 – датчик давления топлива; 10 – топливная рампа высокого давления; 11 – датчик положения распределительного вала; 12 – кислородный датчик перед первичным каталитическим нейтрализатором; 13 – клапан рециркуляции отработавших газов; 14 – форсунка высокого давления; 15 – датчик детонации; 16 – датчик температуры охлаждающей жидкости системы охлаждения двигателя, 17 – первичный каталитический нейтрализатор (трехкомпонентный);

18 – кислородный датчик после первичного каталитического нейтрализатора (опция);

19 – датчик частоты вращения коленчатого вала,

20 – блок управления двигателем;

21 – интерфейс CAN;

22 – лампа сигнализации неисправностей;

23 – диагностический интерфейс;

24 – интерфейс блока управления иммобилайзером,

25 – педаль акселератора с датчиком положения педали;

26 – топливный бак

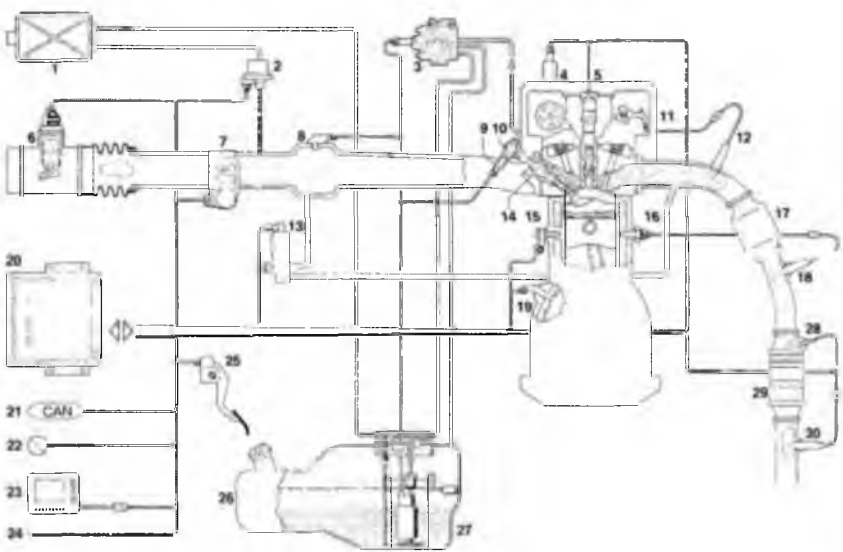
27 – встроенный в бак модуль с топливным насосом, топливным фильтром и регулятором давления топлива;

28 – датчик температуры отработавших газов;

29 – главный каталитический нейтрализатор

NO_x аккумуляторного типа и трехкомпонентный каталитический нейтрализатор;

30 – кислородный датчик после главного каталитического нейтрализатора



Заряд смеси в цилиндре

Компоненты

Заряд цилиндра представляет собой массу смеси, оставшейся в цилиндре после закрытия впускных клапанов. Заряд состоит из топливно-воздушной смеси, поступившей в цилиндр до закрытия впускных клапанов, и остаточных отработавших газов.

Свежая топливовоздушная смесь

Компонентами всасываемой свежей топливновоздушной смеси являются свежий воздух и. в системах с внешним смесеобразованием, распыленное в нем топливо (см. рис. 1). Основное количество свежего воздуха поступает через дроссельную заслонку, дополнительное количество свежей топливновоздушной смеси может быть подано через систему улавливания паров топлива. Смесь поступившая в цилиндр двигателя до закрытия впускных клапанов, является решающим фактором процесса сгорания, определяющим величину крутящего момента двигателя. Поэтому для повышения максимального крутящего момента и мощности двигателя почти всегда требуется увеличивать массу заряда. Теоретическая максимальная масса заряда определяется рабочим объемом цилиндра, а в случае двигателей с наддувом также достижимым давлением наддува.

Рис. 1. Подача заряда смеси в цилиндр бензинового двигателя:
1 – воздух и пары топлива, 2 – клапан продувки угольного фильтра, 3 – подсоединение к системе улавливания паров топлива, 4 – рециркуляция отработавших газов (EGR); 5 – клапан системы рециркуляции отработавших газов, 6 – поток воздуха при атмосферном давлении, 7 – поток воздуха при давлении во впускном трубопроводе; 8 – свежий заряд топливно-воздушнои смеси при давлении в камере сгорания, 9 – заряд остаточных отработавших газов (при давлении в камере сгорания), 10 – отработавшие газы (противодавление отработавших газов). 11 – впускной клапан; 12 выпускной клапан, α – угол открытия дроссельной заслонки



Остаточные отработавшие газы в цилиндре

К остаточным отработавшим газам, входящим в состав заряда, относятся:
- масса отработавших газов, оставшаяся в цилиндре, и не вытесненная из него за время открытого состояния выпускного клапана;
- при наличии системы рециркуляции отработавших газов – масса возвращенных отработавших газов.

Количество остаточных отработавших газов в цилиндре определяется циклом заряда. Они не оказывают прямого вклада в процесс сгорания топлива, но оказывают влияние на процессы зажигания и сгорания топлива в целом. При полностью открытой дроссельной заслонке количество остаточных отработавших газов должно быть как можно меньшим, чтобы обеспечить максимальную массу свежего воздуха и выходную мощность двигателя.

В то же время при частичной нагрузке присутствие остаточных отработавших газов желательно для снижения расхода топлива. Это достигается посредством более благоприятного цикла, за счет изменения состава смеси, а также снижения потерь на прокачивание, поскольку для подачи такого же заряда свежего воздуха требуется более высокое давление во впускном трубопроводе. Специально введенное количество остаточных отработавших газов может снизить содержание в отработавших газах оксидов азота (NO_x) и несгоревших углеводородов (HC).

Регулирование заряда воздуха

Для двигателей с искровым зажиганием, с наружным и внутренним смесеобразованием и гомогенным зарядом смеси в цилиндре крутящий момент двигателя определяется величиной заряда воздуха. В отличие от этого, в случае внутреннего смесеобразования с избыточным количеством воздуха крутящий момент двигателя можно регулировать, изменяя количество впрыскиваемого топлива (работа с послойным распределением заряда топлива).

Дроссельная заслонка

Дроссельная заслонка является основным устройством регулирования массового расхода воздуха. За счет дросселирования потока, когда дроссельная заслонка открывается не полностью, уменьшается развиваемый крутящий момент (максимальное значение которого может быть получено при полностью открытой заслонке). Этот эффект дросселирования зависит от положения дроссельной заслонки и, следовательно, от площади сечения открытого канала, а также от частоты вращения коленчатого вала (см. рис. 2). Максимальный крутящий момент развивается при полностью открытой дроссельной заслонке.

На двигателях с электронной системой регулирования положения дроссельной заслонки (ETC) требуемый заряд воздуха вычисляется, исходя из желаемого значения крутящего момента двигателя (положения педали акселератора), в зависимости от которого дроссельная заслонка открывается на соответствующий угол.

В механических системах водитель сам изменяет степень открытия дроссельной заслонки, нажимая педаль акселератора.

Цикл подачи заряда смеси в цилиндр

Цикл подачи свежего заряда топливно-воздушной смеси и остаточных отработавших газов регулируется открытием и закрытием впускных и выпускных клапанов. Критичными факторами являются продолжительность открытого и закрытого состояния клапанов и характеристика подъема клапана.

Изменение фаз газораспределения

Период перекрытия клапанов, когда впускной и выпускной клапаны одновременно открыты, оказывает решающее влияние на массу отработавших газов, оставшихся в цилиндре. Количество свежей топливно-воздушной смеси и остаточных отработавших газов в цилиндре можно регулировать, изменяя характеристику подъема клапанов во времени (внутренняя рециркуляция отработавших газов).

Большой угол перекрытия клапанов (при раннем открытии впускного клапана) позволяет увеличить внутреннюю рециркуляцию отработавших газов и поэтому может помочь в снижении выбросов NO_x. Однако, т. к. рециркулирующие отработавшие газы вытесняют свежую топливно-воздушную смесь, раннее открытие впускного клапана также ведет к уменьшению максимального крутящего момента. Кроме того, чрезмерная рециркуляция отработавших газов, особенно при работе двигателя на холостом ходу, может стать причиной перебоев в зажигании, что, в свою очередь, приводит к увеличению выбросов углеводородов (HC). При наличии системы регулирования фаз газораспределения, такое регулирование в зависимости от рабочей точки двигателя позволит оптимизировать количество выбросов.

Посредством регулирования фаз газораспределения можно регулировать массовый расход воздуха и, следовательно, крутящий момент двигателя без использования дроссельной заслонки. Посредством регулирования фаз газораспределения также можно регулировать количество остаточных отработавших газов.

В современных системах клапаны приводятся в действие механически от распределительного вала. В некоторой степени этот процесс можно регулировать при помощи дополнительных систем (например, системы регулирования положения распределительного вала). Однако, эти механические системы не могут полностью исключить необходимость в дроссельной заслонке.

Рециркуляция отработавших газов (EGR)

Масса остаточных отработавших газов в цилиндре также может быть увеличена за счет «внешней рециркуляции отработавших газов» (EGR). В этом случае впускной трубопровод и выпускной коллектор соединяются друг с другом через дополнительный клапан (см. рис. 1). Когда этот клапан открыт, и имеет место перепад давлений во впускном трубопроводе и в системе выпуска

Рис. 2. Диаграмма работы дроссельной заслонки бензинового двигателя
– – – промежуточные положения дроссельной заслонки.



отработавших газов, двигатель всасывает смесь свежей топливно-воздушной смеси и отработавших газов. Блок управления двигателем (ECU), вычисляет степень рециркуляции отработавших газов, необходимую для данного рабочего состояния двигателя, и соответствующим образом активирует клапан рециркуляции отработавших газов.

Снижение расхода топлива

Рециркуляция отработавших газов вызывает увеличение давления во впускном трубопроводе. Это увеличение давления вызывает уменьшение работы, совершаемой в процессе цикла подачи заряда смеси в цилиндр, что способствует снижению расхода топлива.

Снижение выбросов NO_x

Системы рециркуляции отработавших газов применяются на автомобилях с бензиновыми двигателями с прямым впрыском топлива, работающими на обедненной смеси (в режиме послойного распределения заряда) для снижения содержания NO_x в отработавших газах. Рециркуляция отработавших газов является основным способом свести к минимуму количество выбросов оксидов азота и таким образом увеличить продолжительность работы двигателя на обедненной смеси, которая ограничивается состоянием каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа.

Отработавшие газы направляются обратно в камеру сгорания для снижения максимальной температуры сгорания с целью снижения образования NO_x. Снижение температуры достигается благодаря тому, что возвращенные отработавшие газы не участвуют в процессе сгорания смеси и, следовательно, не добавляют энергии горения. Они также представляют собой дополнительную тепловую массу – это означает, что энергия сгорания топлива распределяется по большей общей массе.

Увеличение температуры горения топлива вызывает непропорциональное увеличение количества выбросов NO_x. Поскольку рециркуляция отработавших газов (EGR) вызывает снижение этой температуры, она представляет собой особенно эффективный способ снижения количества выбросов NO_x.

Наддув двигателя

Величина создаваемого крутящего момента пропорциональна поступающему в цилиндры заряду топливно-воздушной смеси. Это позволяет повысить максимальный крутящий момент за счет увеличения заряда воздуха в цилиндрах. Это может быть достигнуто динамическим наддувом, механическим наддувом или турбонаддувом с использованием энергии отработавших газов (см. «Наддув»)

Компоненты электронной системы управления дроссельной заслонкой (ETC)

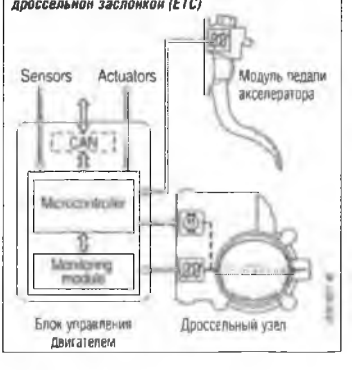
Основные компоненты регулирования заряда воздуха показаны на рис. 1. Наиболее важным компонентом в современных системах является дроссельная заслонка.

Электронная система управления дроссельной заслонкой (см. рис. 3) состоит из модуля педали акселератора, блока управления двигателем и дроссельного узла. Дроссельный узел включает дроссельную заслонку, привод дроссельной заслонки и датчик положения дроссельной заслонки. Привод дроссельной заслонки представляет собой электродвигатель постоянного тока, воздействующий на вал дроссельной заслонки через редуктор. Датчик положения дроссельной заслонки является в данном случае дублирующим элементом.

Команда водителя считывается датчиком положения педали акселератора и передается на блок управления двигателем. Блок управления двигателем вычисляет требуемую величину заряда смеси в зависимости от рабочей точки двигателя и регулирует угол открытия дроссельной заслонки, используя для этого привод и датчик положения дроссельной заслонки.

Дублирование работы модуля педали акселератора и дросселирующего устройства является частью концепции мониторинга ETC, позволяющей уменьшить вероятность сбоев.

Рис. 3. Электронная система управления дроссельной заслонкой (ETC)



Подача топлива

Системы подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод

Используются системы подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод различной конфигурации, работающие при типичном значении давления 300 – 400 кПа (3 – 4 бар).

Система с возвратом топлива

Подачу топлива и создание давления впрыска осуществляет электроприводный топливный насос (см. рис. 1). Топливо засасывается из топливного бака и, пройдя через топливный фильтр, по топливопроводу высокого давления поступает в смонтированную на двигателе топливную рампу. Из топливной рампы топливо подается к форсункам. Регулятор давления топлива, установленный на рампе, поддерживает постоянный перепад давления между топливными форсунками и впускным трубопроводом независимо от абсолютного давления во впускном трубопроводе, т.е. нагрузки двигателя.

Излишки топлива возвращаются в топливный бак по возвратной линии, подсоединенной к регулятору давления топлива. Избыточное топливо, нагретое в моторном отсеке, вызывает повышение температуры топлива в топливном баке. При этом увеличивается выделение паров топлива. В соответствии с требованиями к защите окружающей среды пары топлива собираются системой улавливания паров топлива и направляются в угольный фильтр для временного хранения до возврата во впускной трубопровод для сжигания в двигателе (см. «Система улавливания паров топлива»).

Рис. 1. Система подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод (с возвратом топлива в топливный бак):
1 – топливный бак, 2 – электроприводный топливный насос; 3 – топливный фильтр, 4 – линия высокого давления; 5 – регулятор давления, 6 – топливные форсунки; 7 – топливная рампа (с возвратом топлива), 8 – линия возврата топлива, 9, 10 – направление потока топлива



Система без возврата топлива

В такой системе подачи топлива регулятор давления располагается в топливном баке или вблизи него, что исключает необходимость в линии возврата топлива из двигателя в топливный бак.

Поскольку регулятор давления топлива, за счет места его установки, не связан с впускным трубопроводом, относительное давление впрыска не зависит от нагрузки двигателя. Это учитывается при вычислении продолжительности впрыска в блоке управления двигателем

В топливную рампу подается только такое количество топлива, которое подлежит впрыску. Излишнее топливо, подаваемое электроприводным топливным насосом, возвращается прямо в топливный бак, не проходя длинный путь через моторный отсек. Таким образом, нагрев топлива в топливном баке и, следовательно, выделение паров топлива значительно ниже, чем в системах с возвратом топлива.

В связи с этими преимуществами в настоящее время в основном используются системы подачи без возврата топлива.

Система подачи без возврата топлива с регулированием по потребности

В системе подачи топлива с регулированием по потребности топливный насос подает только количество топлива, требуемое в данный момент времени для двигателя и необходимое для создания требуемого давления. Регулирование давления топлива осуществляется блоком управления двигателем в режиме замкнутого регулирования. Текущее давление топлива регистрируется датчиком низкого давления (см. рис. 2). Это исключает необходимость в регуляторе давления топлива. Регулирование объемного расхода топлива осуществляется посредством изменения напряжения питания топливного насоса, осуществляемого специальным модулем в блоке управления двигателем.

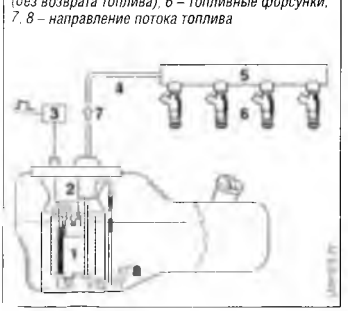
Система снабжена предохранительным клапаном, предотвращающим чрезмерное повышение давления даже после отсечки подачи топлива или выключения двигателя.

Регулирование по потребности позволяет избежать подачи избыточного топлива и, следовательно, свести к минимуму требуемую производительность топливного насоса. Это дает снижение расхода топлива по сравнению с системами с неуправляемым электроприводным топливным насосом. Применение таких систем позволяет в еще большей степени снизить температуру топлива в топливном баке.

Еще одно преимущество системы регулированием по потребности заключается в возможности регулирования давления топлива. С одной стороны, давление может быть увеличено во время пуска горячего двигателя во избежание образования пузырьков паров топлива. С другой стороны, прежде всего, на двигателях с наддувом появляется возможность впрыска как очень больших, так и очень малых количеств топлива, повышая давление топлива при полной нагрузке и снижая его при низкой нагрузке двигателя.

Кроме того, измерение давления топлива в такой системе дает дополнительные возможности диагностики по сравнению с другими системами. За счет учета текущего давления топлива при вычислении продолжительности впрыска обеспечивается более точное дозирование топлива.

Рис. 2 Система подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод (система с регулированием подачи по потребности):
1 – электроприводный топливный насос с топливным фильтром (топливный фильтр может быть установлен вне топливного бака); 2 – клапан сброса давления и датчик давления (в качестве альтернативы датчик давления может быть установлен в топливной рампе); 3 – тактовый генератор для управления электроприводным топливным насосом, 4 – нагнетательная линия; 5 – топливная рампа (без возврата топлива), 6 – топливные форсунки, 7, 8 – направление потока топлива



Системы подачи топлива с прямым впрыском топлива

По сравнению с системами с впрыском топлива во впускной трубопровод при прямом впрыске имеется только ограниченное временное окно для впрыска топлива прямо в камеру сгорания. Поэтому здесь более важен процесс смесеобразования, и давление впрыска должно быть до 50 раз больше по сравнению с системами с впрыском топлива во впускной трубопровод. Топливная система подразделяется на контур низкого давления и контур высокого давления.

Система низкого давления

В системах прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей система низкого давления служит для питания топливом системы высокого давления с использованием тех же компонентов, что и в системах с впрыском топлива во впускной трубопровод. Вследствие высоких температур в насосе высокого давления в условиях пуска горячего двигателя и работы двигателя при высоких температурах наружного воздуха для предотвращения образования пузырьков газа в топливе требуется более высокое предварительное давление (давление на впуске) Отсюда вытекает целесообразность использования систем с регулируемым низким давлением. Эти системы обеспечивают давление на впуске, оптимальное для любого рабочего состояния двигателя; давление на впуске обычно регулируется в диапазоне 300 – 600 кПа (3 – 6 бар).

Система высокого давления

В системах высокого давления в основном используются регулируемые насосы высокого давления или насосы высокого давления с постоянной подачей. Система включает топливный распределитель (топливную рампу высокого давления) с топливными форсунками высокого давления и датчик высокого давления (см. рис. 3 и 4) Для системы с постоянной подачей топлива также требуется отдельный клапан регулирования давления.

Требуемое давление устанавливается в соответствии с сигналом давления, измеряемым системой управления двигателя и обрабатываемым программой регулирования высокого давления. В зависимости от рабочей точки двигателя в системах с непрерывной подачей топлива давление регулируется в диапазоне от 5 до 11 МПа (50 – 110 бар), а

в системах с регулированием давления по потребности – до 20 МПа (200 бар). Сигнал датчика давления используется для вычисления продолжительности впрыска топлива и для диагностики топливной системы.

Система непрерывной подачи топлива

Насос высокого давления, приводимый во вращение распределительным валом двигателя, обычно представляет собой трехцилиндровый радиально-поршневой насос (см. «Насосы высокого давления для систем прямого впрыска топлива»), который нагнетает топливо в топливную рампу, преодолевая давление в системе (см. рис. 3). Величина подачи топлива насосом не регулируется. Давление излишнего топлива, не требуемого для впрыска, или поддержания давления, сбрасывается клапаном регулирования давления, и топливо возвращается в контур низкого давления. С этой целью блок управления двигателем управляет клапаном регулирования давления таким образом, чтобы получить давление впрыска, требуемое для данного режима работы. Клапан регулирования давления также служит в качестве клапана ограничения давления.

В системах с непрерывной подачей топлива в большинстве рабочих точек двигателя в систему высокого давления подается значительно больше топлива, чем требуется двигателю. Это приводит к потерям энергии и, следовательно, к более высокому расходу топлива по сравнения с системами с регулированием по потребности. Кроме того, излишнее топливо, сбрасываемое через клапан регулирования давления, способствует повышению температуры в топливной системе. По этой причине в современных двигателях с прямым впрыском топлива применяются только системы высокого давления с регулированием по потребности.

Система с регулированием по потребности

В системе с регулированием по потребности топливный насос высокого давления, обычно одноцилиндровый радиально-поршневой

Рис. 3. Система прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей (с непрерывной подачей топлива):

1 – всасывающий насос;
2 – электроприводный топливный насос с топливным фильтром,
3 – регулятор давления топлива;
4 – линия низкого давления;
5 – насос высокого давления с непрерывной подачей топлива,
6 – линия высокого давления,
7 – датчик высокого давления;
8 – топливная рампа;
9 – клапан регулирования давления,
10 – форсунки высокого давления,
11, 12 – направление потока топлива

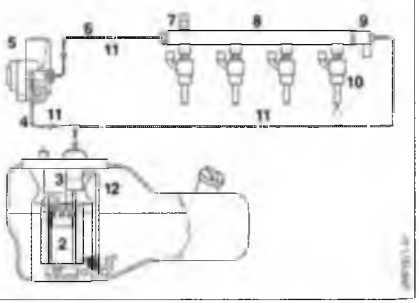
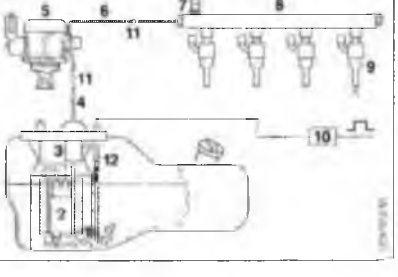


Рис. 4. Система прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей (с регулированием подачи топлива по потребности):

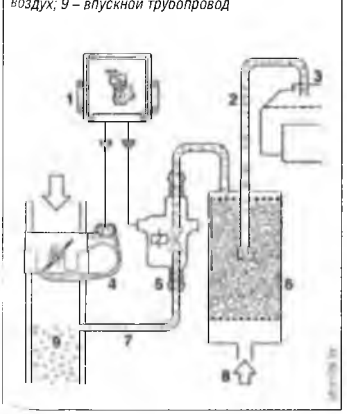
1 – всасывающий насос, 2 – электроприводный топливный насос с топливным фильтром, 3 – клапан сброса давления и датчик давления (датчик давления может быть установлен в линии низкого давления), 4 – линия низкого давления, 5 – регулируемый насос высокого давления с встроенными клапанами регулирования подачи топлива и ограничения давления, 6 – линия высокого давления, 7 – датчик высокого давления, 8 – топливная рампа, 9 – форсунки высокого давления, 10 тактовый генератор для управления электроприводным топливным насосом, 11, 12 – направление потока топлива



насос (см. «Насосы высокого давления для систем прямого впрыска топлива»), подает топливо в топливную рампу только в количестве, фактически необходимом для впрыска и обеспечения требуемого давления. Насос обычно приводится в действие распределительным валом (однопоршневые насосы приводятся в действие специальными кулачками, приводящими в движение плунжер насоса). Подача топлива регулируется встроенным в насос высокого давления регулировочным клапаном. Блок управления двигателем управляет этим клапаном с высокой точностью, что обеспечивает подачу топлива в количестве, требуемом для создания необходимого для данного режима работы двигателя давления в топливной рампе.

В целях обеспечения безопасности контур высокого давления включает предохранительный клапан, обычно встраиваемый в насос высокого давления. В случае превышения давлением допустимого уровня топливо возвращается через клапан ограничения давления в контур низкого давления.

Рис. 5. Система улавливания паров топлива:
1 – блок управления двигателем;
2 – линия вентиляции топливного бака,
3 – топливо; 4 – дроссельный узел;
5 – клапан продувки, 6 – угольный фильтр,
7 – линия к впускному трубопроводу; 8 – свежий воздух; 9 – впускной трубопровод



Система улавливания паров топлива

Функция, конструкция и принцип действия

Система улавливания паров топлива требуется для автомобилей с двигателями с искровым зажиганием (SI). Ее назначением является улавливание и сбор паров топлива из топливного бака в целях соблюдения требований законодательства в отношении предельно допустимого выделения паров топлива. Следует отметить, что интенсивность испарения топлива возрастает при повышении его температуры. Повышение температуры топлива может вызываться высокой температурой наружного воздуха, нагревом топливного насоса, встроенного в топливный бак или, в зависимости от системы подачи топлива, возвратом в топливный бак топлива, нагретого в двигателе. Выделение паров топлива также усиливается при понижении атмосферного давления или во время движения на подъем.

Система улавливания паров топлива включает угольный фильтр, к которому присоединен шланг вентиляции топливного бака, а также регенерационного клапана, подсоединенного к угольному фильтру и впускному трубопроводу (см. рис. 5). Активированный уголь поглощает пары топлива и позволяет выходить в атмосферу только воздуху. Вследствие разрежения во впускном трубопроводе свежий воздух прогоняется через угольный фильтр, когда во время движения автомобиля продувочный клапан открывает линию, соединяющую угольный фильтр с впускным трубопроводом. Свежий воздух захватывает поглощенное фильтром топливо и уносит его в двигатель для сжигания. Этот процесс известен под названием продувки угольного фильтра.

Регулирование объемного расхода продувочного воздуха осуществляется блоком управления двигателем в зависимости от режима работы двигателя. Чтобы угольный фильтр всегда был способен поглощать пары топлива, активированный уголь необходимо регулярно регенерировать. В системах с прямым впрыском топлива (бензиновые двигатели) из-за небольшой разности атмосферного давления и давления во впускном трубопроводе при работе в режиме послойного распределения заряда топлива, для продувки необходимо перейти в режим работы на гомогенной смеси.

Топливный фильтр

Функция

Назначением топливного фильтра является фильтрация топлива, поступающего в топливную систему. Для защиты компонентов системы, в особенности топливных форсунок, необходимо удалить из топлива загрязнения, которые могут попасть в топливный бак во время заправки автомобиля или вентиляции топливного бака.

Конструкция

Топливные фильтры для двигателей с искровым зажиганием (бензиновые фильтры) устанавливаются на стороне нагнетания насоса подачи топлива. В последнее время все шире применяются фильтры, встраиваемые непосредственно в топливный бак. В этом случае фильтр не подлежит замене и должен быть рассчитан на весь срок службы автомобиля. В то же время продолжают использоваться топливные фильтры, встраиваемые в линию подачи топлива. Отсюда следует, что фильтры могут представлять собой как сменные элементы, так и элементы, рассчитанные на весь срок службы автомобиля.

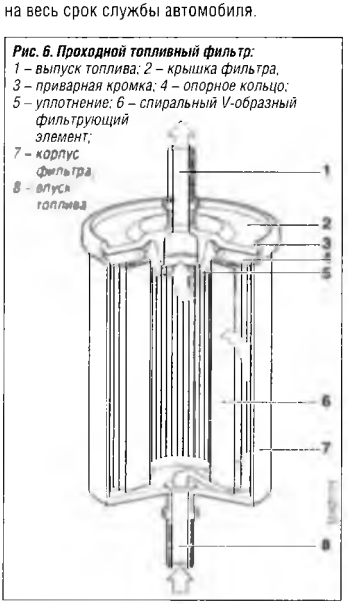


Рис. 6. Проходной топливный фильтр:
1 – выпуск топлива; 2 – крышка фильтра, 3 – приварная кромка; 4 – опорное кольцо; 5 – уплотнение; 6 – спиральный V-образный фильтрующий элемент; 7 – корпус фильтра 8 – впуск топлива

Корпус фильтра изготавливается из стали, алюминия или пластмассы. Фильтр соединяется с линией подачи топлива при помощи резьбового соединения, трубки или быстроразъемного соединения. Корпус содержит фильтрующий элемент, задерживающий частицы грязи (см. рис. 6). Фильтрующий элемент встроен в контур подачи топлива таким образом, что топливо проходит через всю поверхность фильтрующей среды, насколько возможно, с одной и той же скоростью потока

Фильтрующая среда

В качестве фильтрующей среды используется специальная, пропитанная смолой бумага из целлюлозного волокна, в некоторых случаях (для работы в тяжелых условиях) сцепленная методом оплавления со слоем синтетического волокна. Этот слой призван обеспечить высокую температурную и химическую стойкость фильтрующего элемента. Эффективность фильтрации и сопротивление фильтра потоку определяются пористостью бумаги и распределением пор.

Фильтры для бензиновых двигателей имеют спиральную или радиальную форму. В фильтре спиральной формы тисненая фильтровальная бумага обернута вокруг несущей трубки. Топливо протекает через фильтр в продольном направлении.

В фильтре радиальной формы бумага сложена и вставлена в корпус в форме звезды. Устойчивость фильтрующего элемента обеспечивается пластмассовыми, резиновыми или металлическими торцевыми кольцами и, при необходимости, внутренней защитной оболочкой. Топливо протекает через фильтр снаружи внутрь, при этом частицы грязи отделяются от топлива фильтрующей средой.

Требования

Требуемая тонкость фильтрации зависит от используемой системы впрыска топлива. Фильтрующий элемент для систем с впрыском топлива во впускной трубопровод имеет среднюю ширину пор приблизительно 10 мкм. Для бензиновых двигателей с прямым впрыском топлива требуется более тонкая фильтрация. В этом случае средняя ширина пор составляет около 5 мкм. При этом фильтрующий элемент должен задерживать до 85% частиц размером более 5 мкм. Кроме того, новый фильтр для системы прямого впрыска топлива (бензина) должен отвечать следующему требованию: частицы металла, минералов и пластмассы диаметром более 400 мкм не должны вымываться топливом из фильтра

Эффективность фильтра зависит от направления потока. Поэтому при замене встраиваемых в линию (проходных) фильтров следует соблюдать направление потока, указанное стрелкой на корпусе фильтра.

Интервал замены обычных проходных фильтров, в зависимости от объема фильтра и степени загрязнения топлива, составляет от 30 000 до 90 000 км. Фильтры, встраиваемые в топливный бак, рассчитаны не менее, чем на 160 000 км пробега. В настоящее время существуют проходные и встраиваемые в топливный бак фильтры для систем прямого впрыска топлива, ресурс которых достигает 250 000 км.

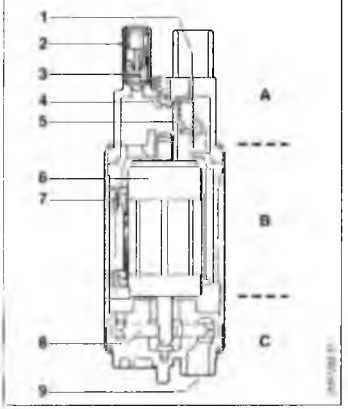
Электроприводные топливные насосы

Топливный насос с электроприводом должен подавать достаточное количество топлива в двигатель и одновременно поддерживать нужное давление, обеспечивающее эффективный впрыск топлива при всех условиях работы. Основными требованиями к насосу являются:

- производительность при номинальном напряжении от 60 до 300 л/ч;
- давление в топливной системе от 300 до 650 кПа (3,0 – 6,5 бар);
- повышение давления в системе при напряжении питания, составляющем 50-60 % от номинального напряжения; определяющим фактором здесь является работа насоса во время пуска холодного двигателя.

Кроме того, электрические топливные насосы все шире применяются в современных системах прямого впрыска топлива для бензиновых и дизельных двигателей в качестве насосов предварительной подачи топлива. Для бензиновых двигателей иногда, во время работы в условиях высоких температур, требуется обеспечить давление топлива до 700 кПа.

Рис. 7: Электроприводный топливный насос центробежного типа:
A – крышка; B – электродвигатель, C – цилиндр насоса,
1 – электрический контакт,
2 – гидравлическое соединение (выпуск топлива);
3 – обратный клапан,
4 – клапан сброса давления;
5 – коллектор с угольными щетками;
6 – якорь электродвигателя с обмотками, запитываемыми через коллектор;
7 – магнит,
8 – крыльчатка центробежного насоса;
9 – гидравлическое соединение (выпуск топлива)



Конструкция системы

Электроприводный топливный насос (см. рис. 7) приводится в действие электродвигателем. В качестве стандартного компонента в этом двигателе используется медный коллектор. Для двигателей насосов высокой мощности, специальных применений и дизельных систем применяются графитовые коллекторы. В настоящее время на новых автомобилях все шире применяются электронные коммутирующие устройства, для которых коллектор и угольные щетки не требуются.

Собственно насос может быть центробежного или вытеснительного типа. Кроме того, насос включает торцевую крышку с электрическим контактом, обратный клапан (для поддержания давления в системе), при необходимости предохранительный клапан и выпускной патрубок. В большинстве случаев в торцевых крышках устанавливаются угольные щетки коллектора электродвигателя и иногда помехоподавляющие элементы – катушки индуктивности и конденсаторы).

Вытеснительные насосы

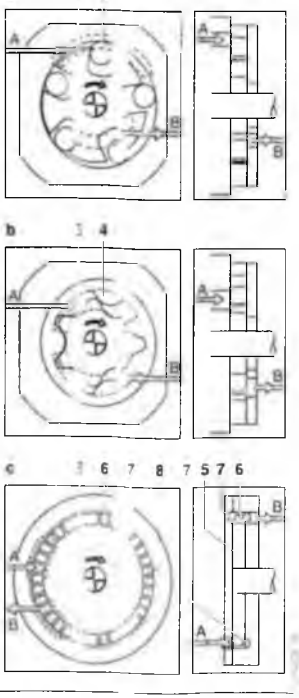
В вытеснительном насосе объемы жидкости засасываются и транспортируются в закрытой камере (за исключением утечек) на сторону высокого давления за счет вращения насосного элемента. В качестве электроприводного топливного насоса могут использоваться роторный роликовый насос (см. рис. 8, а),

шестеренный насос с внутренним зацеплением (см. рис. 8, b) или центробежный насос.

Вытеснительные насосы имеют преимущества при высоких давлениях (450 кПа и выше) и имеют хорошую низковольтную характеристику, т.е. их производительность в определенном диапазоне напряжения изменяется незначительно. К.п.д. насоса составляет около 33 %. Присущие этому насосу импульсы давления могут вызывать дополнительный шум, уровень которого зависит от конструктивных особенностей насоса и места его установки.

В то время как в современных электронных системах впрыска топлива для бензиновых двигателей в основном применяются насосы центробежного типа, отвечающие всем требованиям, предъявляемым к электрическим топливным насосам, вытеснительные насосы нашли новую область применения в качестве предварительных насосов подачи топлива для систем прямого впрыска топлива (бензиновых и дизельных двигателей) с их значительно более высокими требованиями к рабочему давлению и диапазону вязкости топлива.

Рис. 8. Принцип действия электроприводных топливных насосов
a – роторный топливный насос; b – шестеренчатый насос с внутренним зацеплением; c – центробежный насос. A – всасывающее отверстие, B – выпуск: 1 – ротор с лопатками (эксцентриковый); 2 – ролик 3 – внутреннее ведущее колесо 4 – ротор (эксцентриковый), 5 – крыльчатка, 6 – лопатки крыльчатки, 7 – канал (периферийный), 8 –отверстие для выпуска газов



Центробежный насос

Центробежный насос стал общепринятым выбором для систем впрыска топлива с давлением до 600 кПа. Крыльчатка с большим количеством лопаток вращается в камере, состоящей из двух фиксированных секций (см. рис. 8, c). Каждая из этих секций имеет канал, расположенный вдоль пути перемещения лопаток крыльчатки; на одном конце канала предусмотрены отверстия, расположенные в плоскости всасывающих отверстий насоса. Отсюда они доходят до точки выпуска топлива из насоса под предварительным давлением. Маленькое отверстие для выпуска газов, расположенное на определенном угловом расстоянии от всасывающего отверстия, служит для улучшения работы насоса при перекачке нагретого топлива; через это отверстие наружу выпускаются пузырьки газа (с минимальными утечками).

Давление возрастает вдоль канала в результате обмена импульсами давления между лопатками крыльчатки и частицами жидкости. Это приводит к движению по спиральной траектории объема жидкости, захваченного в крыльчатке и каналах.

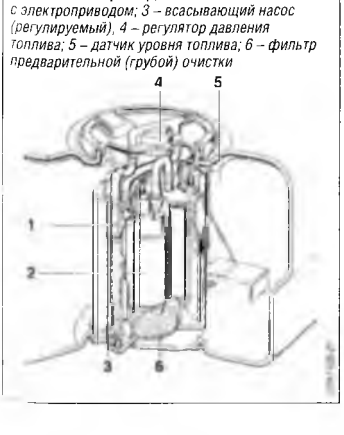
Насосы центробежного типа отличаются низким уровнем шума, поскольку повышение давления происходит непрерывно и практически без пульсаций. Конструкция этого насоса значительно проще по сравнению с насосом вытеснительного типа. Одноступенчатые насосы позволяют получать давление в системе до 600 кПа; к.п.д. этих насосов достигает 26%

Топливные модули

В то время как в первых электронных системах впрыска топлива для бензиновых двигателей электроприводный топливный насос устанавливался исключительно вне топливного бака, в настоящее время общепринятой практикой является его установка в топливном баке. В этом случае электроприводный топливный насос является частью топливного модуля (см. рис. 9), который может также включать следующие элементы:

- топливный резервуар для резерва топлива (обычно наполняемый всасывающим насосом или пассивно, через систему заслонок, переключающий клапан и т.д.);
- датчик уровня топлива;
- регулятор давления топлива для топливных систем без возврата топлива в бак;
- фильтр на стороне всасывания для защиты насоса от загрязнения;
- сетчатый фильтр тонкой очистки, не требующий замены на протяжении всего срока службы автомобиля;
- электрические и гидравлические соединители;
- модуль также может включать датчик давления паров топлива в топливном баке (для диагностики утечек из бака), датчик давления топлива (для систем с регулируемой подачей топлива) и различные клапаны.

Рис. 9: Модуль подачи топлива:
1 – топливный фильтр; 2 – топливный насос с электроприводом; 3 – всасывающий насос (регулируемый), 4 – регулятор давления топлива; 5 – датчик уровня топлива; 6 – фильтр предварительной (грубой) очистки



Насосы высокого давления для систем прямого впрыска топлива

Функцией насоса высокого давления является сжатие топлива, подаваемого в достаточном количестве электроприводным топливным насосом при давлении на впуске, зависимом от температуры и частоты вращения коленчатого вала (программно определенное значение) до уровня высокого давления впрыска топлива.

Регулируемый насос высокого давления

Конструкция и принцип действия

Регулируемый насос высокого давления фирмы Bosch используется в системах прямого впрыска топлива для создания давления впрыска до 20 МПа (в системах прямого впрыска топлива 2-го поколения). Он представляет собой одноцилиндровый насос, работающий в масле (см. рис. 10) со встроенными клапаном регулирования подачи (также называемым дозирующим устройством), клапаном сброса давления на стороне высокого давления и демпфером пульсаций давления топлива на стороне низкого давления. В целях соблюдения строгих стандартов качества топлива и требований законодательства в области снижения токсичности отработавших газов насос изготавливается из нержавеющей стали, и все соединения, относящиеся к системе снижения токсичности отработавших газов, сделаны сварными.

Насос высокого давления установлен как сменный компонент на головке блока цилиндров. Воздействие распределительного вала двигателя на цилиндр насоса осуществляет цилиндрический толкатель при использовании кулачка с двумя выступами (см. рис. 11, a), или роликовый толкатель в случае кулачка с тремя или четырьмя рабочими выступами (см. рис. 11, b). Это обеспечивает подъем кулачка на подающий плунжер насоса высокого давления с выполнением требований в отношении смазки, вибрационных напряжений и механической инерции. Во время подъема кулачка толкатель перемещается в соответствии с его контуром. Это вызывает вертикальное перемещение или рабочий ход подающего плунжера. Во время хода нагнетания толкатель поглощает приложенное давление, силы инерции, усилие пружины и контактные усилия. Толкатель закреплен так, чтобы в ходе процесса не происходило его вращение.

При наличии кулачка с четырьмя выступами, на четырехцилиндровом двигателе возможна синхронизация подачи и впрыска топлива, т.е. сопровождение каждого впрыска

подачей топлива. Таким образом, можно за счет снижения давления в топливной рампе с одной стороны снизить пульсации давления в контуре высокого давления, а с другой стороны уменьшить объем рампы.

В целях обеспечения достаточно быстрого достижения требуемого давления в системе, максимальная производительность насоса высокого давления соответствует максимальной потребности двигателя с запасом, учитывающим различные дополнительные факторы, оказывающие влияние на условия подачи топлива (например, повышение давления при пуске двигателя, высокая температура бензина, износ насоса, динамическая характеристика).

Объемная производительность насоса определяется как отношение количества фактически подаваемого топлива к теоретически возможному максимальному количеству. Она зависит от диаметра и рабочего хода подающего плунжера. Объемная производительность не является постоянной во всем диапазоне частоты вращения коленчатого вала. Она зависит от следующих факторов:

- в нижней части диапазона: утечки через плунжер и другие утечки;
- в верхней части диапазона: инерция и давление открытия клапана;
- во всем диапазоне частоты вращения коленчатого вала: мертвый объем подающей камеры и зависимость сжимаемости топлива от температуры.

Клапан регулирования подачи топлива

Регулирование производительности насоса высокого давления осуществляется при помощи клапана регулирования подачи топлива (см. рис. 12). Топливо, нагнетаемое электроприводным топливным насосом, подается в напорную камеру через впускной клапан открытого клапана регулирования подачи топлива. Во время

Рис. 11. Элементы привода насоса высокого давления:
a – привод с использованием цилиндрического толкателя; b – привод с использованием роликового толкателя; 1 – плунжер насоса, 2 – цилиндрический толкатель; 3 – роликовый толкатель, 4 – кулачок с двумя рабочими выступами, 5 – кулачок с тремя рабочими выступами, 6 – приводной вал

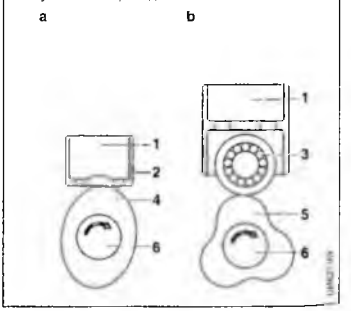
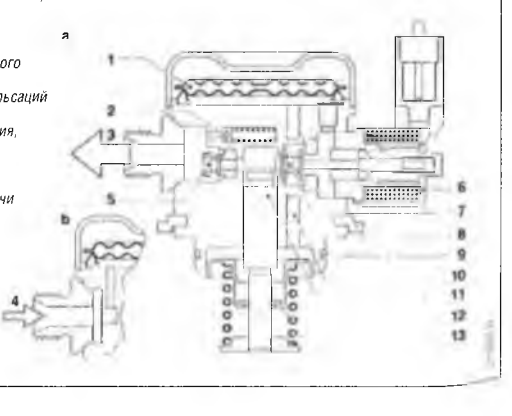


Рис. 10. Одноцилиндровый регулируемый насос высокого давления для систем прямого впрыска топлива 2-го поколения:
a – вид с каналом высокого давления;
b – детальное изображение с каналом низкого давления (смещенным под углом относительно канала высокого давления),
1 – регулируемый демпфер пульсаций давления,
2 – клапан ограничения давления,
3 – канал высокого давления,
4 – канал низкого давления,
5 – выпускной клапан,
6 – клапан регулирования подачи топлива,
7 – впускной клапан,
8 – монтажный фланец
9 – уплотнительное кольцо,
10 – канал к плунжеру (функция демпфирования пульсации давления)
11 – плунжер,
12 – уплотнение плунжера,
13 – пружина плунжера



последующего рабочего хода подачи клапан регулирования подачи топлива остается открытым после прохождения нижней мертвой точки, и излишнее топливо, не требующееся при данной нагрузке двигателя, возвращается в контур низкого давления. После открытия клапана регулирования подачи топлива впускной клапан закрывается, топливо сжимается плунжером насоса и подается в контур высокого давления. Система управления двигателем вычисляет момент включения клапана регулирования подачи топлива в зависимости от требуемой подачи и давления в топливной магистрали. Регулирование осуществляется посредством изменения момента начала подачи топлива.

Демпфер пульсаций давления топлива

В насос высокого давления встроен регулируемый демпфер пульсаций давления топлива, который вместе со ступенчатым плунжером (создающим эффект подкачки во время хода всасывания), сглаживает пульсации давления, создаваемые насосом высокого давления при высоких скоростях вращения, и обеспечивает требуемое наполнение напорной камеры. Демпфер давления забирает определенное количество топлива, отводимого в определенной рабочей точке двигателя, за счет деформации его газонаполненных металлических диафрагм и выпускает его во время хода всасывания для заполнения напорной камеры. При этом возможна работа с регулируемым давлением на впуске, т.е. использование систем с регулированием низкого давления.

Насос высокого давления с непрерывной подачей топлива

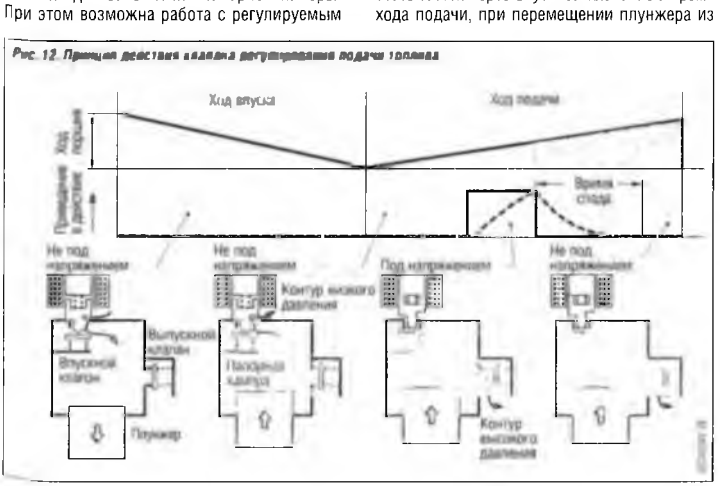
Конструкция и принцип действия

Насос высокого давления с непрерывной подачей топлива фирмы Bosch используется в системах прямого впрыска топлива бензиновых двигателей для создания давления впрыска до 12 МПа (в системах прямого впрыска топлива 1-го поколения). Он представляет собой радиально-поршневой насос с тремя подающими цилиндрами, расположенными по окружности со смещением 120° (см. рис. 13).

На приводном вале насоса, приводимом во вращение от распределительного вала, установлен эксцентриковый кулачок. Он преобразует вращательное движение вала в радиальное перемещение плунжеров насоса. Приводная часть насоса работает в бензине, служащем для охлаждения и смазки.

Топливо, нагнетаемое электроприводным топливным насосом, поступает в насос высокого давления через впускной канал. В плунжерах насоса имеются поперечные и продольные каналы, через которые топливо поступает в вытеснительные камеры трех цилиндров. Во время перемещения плунжера из верхней мертвой точки в нижнюю мертвую точку топливо всасывается через впускной клапан. Во время хода подачи, при перемещении плунжера из

Рис. 13. Принцип действия клапана регулирования подачи топлива



нижней мертвой точки в верхнюю мертвую точку топливо сжимается и через выпускной клапан подается в область высокого давления. Производительность насоса высокого давления с непрерывной подачей топлива пропорциональна его скорости вращения. Три цилиндра насоса, смещены относительно друг друга на 120° для обеспечения перекрытия и, следовательно, непрерывной подачи топлива. Это позволяет свести к минимуму пульсации давления. Благодаря этому, по сравнению с системами с регулированием подачи с однолунжерными насосами, к соединениям и топливопроводам предъявляются менее строгие требования. Кроме того, в данном случае отсутствует необходимость в демпфере пульсаций давления. К недостаткам можно отнести тот факт, что при непрерывной подаче топлива с высоким давлением имеют место более высокие потери мощности по сравнению с системами с регулируемой подачей.

Когда насос работает при постоянном давлении в топливной рампе или при частичной нагрузке двигателя, давление избыточного топлива снижается до уровня давления на впуске

Рис. 14 Клапан регулирования давления:
1 – электрический соединитель; 2 – пружина клапана, 3 – катушка электромагнита; 4 – якорь электромагнита; 5 – игла клапана, 6 – уплотнительное кольцо; 7 – сливное отверстие; 8 – шарик клапана, 9 – седло клапана; 10 – впуск с сетчатым фильтром

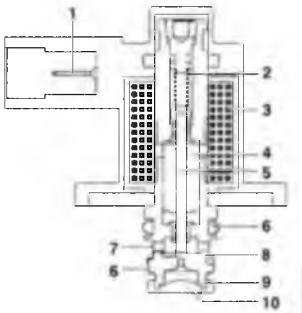
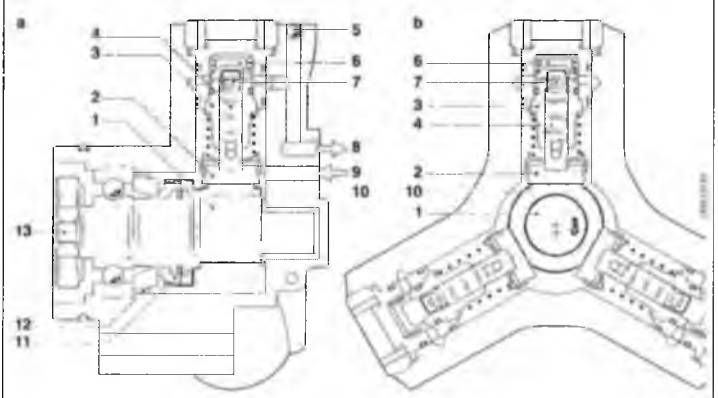


Рис. 13 Насос высокого давления с непрерывной подачей топлива для систем прямого впуска топлива 1-го поколения:
a – продольный разрез, b – поперечный разрез, 1 – эксцентриковый элемент, 2 – ползун, 3 – цилиндр насоса; 4 – плунжер насоса (полый плунжер для впуска топлива); 5 – шарик; 6 – выпускной клапан; 7 – впускной клапан, 8 – канал высокого давления – к топливной рампе, 9 – впуск топлива (низкое давление); 10 – эксцентриковое кольцо; 11 – осевое уплотнение (скользящее кольцевое уплотнение); 12 – статическое уплотнение; 13 – приводной вал



клапаном регулирования давления, установленном на топливной рампе, и возвращается на сторону впуска насоса высокого давления. Уровень давления в контуре высокого давления регулируется блоком управления двигателем, управляющим клапаном регулирования давления.

Клапан регулирования давления

Клапан регулирования давления (см. рис. 14) представляет собой пропорциональный регулирующий клапан, закрытый при отсутствии электрического тока и управляемый широтно модулированным импульсным сигналом. Во время работы при подаче питания на катушку клапана возникает электромагнитная сила, которая, преодолевая усилие пружины, поднимает шарик клапана из седла, тем самым изменяя проходной сечение клапана. Клапан регулирования давления обеспечивает регулирование давления в топливной рампе в функции коэффициента заполнения импульсов. Избыточное топливо, подаваемое насосом высокого давления, возвращается в контур низкого давления.

Пружина клапана выполняет функцию ограничения давления в целях защиты компонентов от чрезмерно высокого давления в топливной рампе, например, в случае сбоя в системе управления клапаном.

В случае выхода из строя одного или более цилиндров насоса, возможна работа на исправных цилиндрах или от электроприводного топливного насоса при давлении, равном давлению на впуске.

Топливная рампа

Впрыск топлива во впускной топливопровод

Назначением топливной рампы является накопление топлива, требующегося для впрыска, сглаживание пульсаций давления форсункам и равномерное распределение топлива по всем форсункам. Топливные форсунки смонтированы непосредственно на рампе. В системах с возвратом топлива возможна установка рядом с топливными форсунками регулятора давления топлива и при необходимости, демпфера пульсаций давления топлива в топливной рампе.

Локальные пульсации давления, вызываемые резонансом, возникающим при открытии и закрытии топливных форсунок, предотвращаются посредством точного расчета размеров топливной рампы. Это позволяет избежать разброса количества впрыскиваемого топлива, который может возникать в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя.

Системы прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей

Назначением топливной рампы является накопление и распределение объема топлива, требуемого для каждой рабочей точки двигателя. Топливо запасается за счет его объема и сжимаемости. Таким образом, объем топлива зависит от мощности двигателя и должен быть адаптирован к потребностям того или иного двигателя (количеству впрыскиваемого топлива) и диапазону давлений. Объем топлива обеспечивает демпфирование пульсаций давления в топливной рампе.

На топливной рампе установлены следующие компоненты системы прямого впрыска топлива: топливные форсунки высокого давления, датчик давления для регулирования высокого давления и клапан ограничения давления (для систем 1-го поколения) .

Топливная рампа для систем впрыска топлива 1-го поколения рассчитана на давление до 12 МПа (плюс запас 0,5 МПа до давления открытия клапана ограничения давления). Для систем 2-го поколения допустимое давление в рампе составляет 20 МПа (плюс запас 0,5 МПа до давления открытия клапана ограничения давления). Разрывное давление, соответственно еще выше.

Регулятор давления топлива

Функции

В системах с впрыском топлива во впускной трубопровод количество топлива, впрыскиваемого форсункой, зависит от продолжительности впрыска и разности между давлением топлива в топливной рампе и противодавлением во впускном трубопроводе. В топливных системах с возвратом топлива влияние давления компенсируется регулятором давления топлива, который поддерживает разность давлений в топливной рампе и впускном трубопроводе на постоянном уровне. Этот регулятор позволяет топливу возвращаться в бак в таком количестве, чтобы падение давления на топливных форсунках оставалось постоянным. Для этого через топливную рампу протe-

кает интенсивный поток топлива, а регулятор давления устанавливается на конце рампы.

В системах без возврата топлива регулятор является частью встраиваемого в бак топливного модуля. Давление в топливной рампе поддерживается на постоянном уровне относительно внешнего давления. Это означает, что перепад давления между топливной рампой и впускным трубопроводом не остается постоянным и должен учитываться при вычислении продолжительности впрыска.

Конструкция и принцип действия

Регулятор давления топлива (см. рис. 15) – диафрагменного переточного типа. Резиновая диафрагма разделяет регулятор давления на топливную камеру и камеру пружины. Через держатель клапана, встроенный в диафрагму, усилие пружины прижимает подвижную тарелку клапана к седлу, и клапан находится в закрытом положении. Как только давление, прилагаемое к диафрагме избыточным топливом, превышает усилие пружины, клапан открывается и позволяет перетекать в топливный бак топливу в количестве, достаточном для поддержания равновесия сил, прилагаемых к диафрагме.

Камера пружины пневматически соединяется с впускным трубопроводом за дроссельной заслонкой. В результате разрежение во впускном трубопроводе также создается в камере пружины. Таким образом, отношение давлений на диафрагме такое же, как на топливных форсунках. Это означает, что падение давления на топливных форсунках зависит только от усилия пружины и площади поверхности диафрагмы и, следовательно, остается постоянным.

Демпфер пульсаций давления топлива

Функция, конструкция и принцип действия

Повторяющееся открытие и закрытие топливных форсунок совместно с прерывистой подачей топлива при использовании топливных насосов вытеснительного типа приводит к колебаниям давления топлива. Это может вызывать резонанс давления, оказывающий неблагоприятное влияние на точность дозирования топлива. При определенных условиях эти колебания могут вызывать шум, передающийся на топливный бак и кузов автомобиля через элементы крепления электроприводного топливного насоса, топливопроводы и топливную рампу. Эти проблемы можно решить посредством использования элементов крепления специальной конструкции и демпферов пульсаций давления

Демпфер пульсаций давления имеет конструкцию, подобную конструкции регулятора давления топлива. Здесь также подпружиненная диафрагма отделяет топливную камеру от воздушной камеры. Усилие пружины подобрано таким образом, что мембрана поднимается из своего седла, как только давление подачи топлива достигает своего рабочего диапазона. Это означает, что топливная камера имеет переменный объем, и не только поглощает топливо при возникновении бросков давления, но также выпускает его, когда давление снижается. Для обеспечения работы в наиболее благоприятном диапазоне при возникновении колебаний абсолютного давления топлива из-за условий, имеющих место во впускном трубопроводе, камера пружины может быть соединена с впускным трубопроводом.

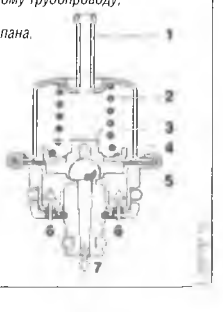


Рис. 15. Регулятор давления топлива:
1 – канал к впускному трубопроводу,
2 – пружина;
3 – держатель клапана,
4 – резиновая диафрагма,
5 – клапан,
6 – подача топлива,
7 – возврат топлива

Образование смеси

Основные принципы

Топливовоздушная смесь

Для работы двигателю с искровым зажиганием (SI) требуется топливовоздушная смесь с определенным соотношением количества воздуха и топлива (отношение воздух/топливо). Идеальное, теоретически полное сгорание топлива имеет место при отношении масс 14,7:1 (стехиометрическое отношение), т.е для сгорания 1 кг топлива требуется 14,7 кг воздуха. Или: топливо объемом 1 *л* полностью сгорает в присутствии 9500 *л* воздуха.

Удельный расход топлива в значительной степени зависит от соотношения воздух/топливо(см. рис. 1). Для обеспечения действительно полного сгорания топлива требуется избыточное количество воздуха и, следовательно, как можно более низкий расход топлива. Однако здесь имеют место ограничения, зависящие от воспламеняемости и доступного времени сгорания смеси.

Также состав смеси влияет на эффективность снижения выбросов токсичных веществ с отработавшими газами. В настоящее время с этой целью используется трехкомпонентный каталитический нейтрализатор, который действует с максимальной производительностью при стехиометрическом соотношении воздух/топливо. Это может значительно снизить вероятность повреждения компонентов системы очистки отработавших газов. Поэтому современные двигатели, когда это позволяют условия работы, работают при стехиометрическом составе смеси.

Для определенных условий работы двигателя требуется адаптация состава смеси. Так, изменение состава смеси требуется при пуске холодного двигателя. Отсюда следует, что системы смесеобразования должны обеспечивать работу двигателя в различных режимах.

Коэффициент избытка воздуха λ

В качестве показателя отличия фактического состава смеси от теоретически необходимого массового отношения (14,7:1) был выбран коэффициент избытка воздуха λ (лямбда). Коэффициент λ равен отношения массы подаваемого в двигатель воздуха к массе воздуха, необходимой для обеспечения стехиометрического состава смеси.

λ = 1: масса подаваемого в двигатель воздуха равна теоретически необходимой массе.

λ < 1: недостаток воздуха и, следовательно, богатая топливно-воздушная смесь. Максимальная выходная мощность двигателя имеет место при λ = 0,85 – 0,95.

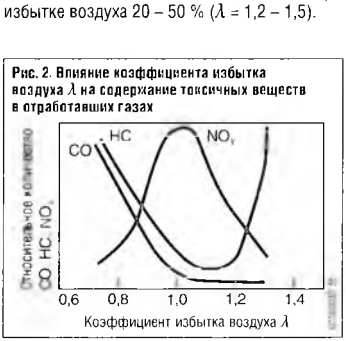
λ > 1: имеет место избыток воздуха, т.е. смесь становится обедненной. При работе на бедной смеси эффективная мощность двигателя падает, при этом обеспечивается снижение расхода топлива. Максимально допустимое значение λ – «предел возникновения пропусков зажигания при обеднении смеси» в значительной степени зависит от конструкции двигателя и используемой системы смесеобразования. При использовании такой смеси она долго не воспламеняется, а процесс сгорания происходит с нарушениями, сопровождаемыми неравномерной работой двигателя.

На двигателях с искровым зажиганием (SI) и впрыском топлива во впускной трубопровод, при постоянной выходной мощности двигателя, минимальный расход топлива достигается в зависимости от двигателя при избытке воздуха 20 – 50 % (λ = 1,2 – 1,5).

Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха λ на удельный расход топлива b_e и неравномерную работу двигателя при постоянной эффективной мощности



Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха λ на содержание токсичных веществ в отработавших газах



На рис. 1 и 2 показаны зависимости удельного расхода топлива, а также содержания различных токсичных веществ в отработавших газах от коэффициента избытка воздуха (при постоянной выходной мощности двигателя). Из этих графиков видно, что нельзя выбрать идеальное значение коэффициента λ, при котором все рассматриваемые показатели были бы в максимальной степени приемлемы. Для двигателей с впрыском топлива во впускной трубопровод для обеспечения «оптимального» расхода топлива при «оптимальной» эффективной мощности приемлемым является значение λ в диапазоне 0,9 – 1,1.

В двигателях с прямым впрыском топлива и послойным распределением заряда смеси имеют место иные условия сгорания топлива, поэтому предел обеднения смеси наступает при значительно более высоких значениях λ. В диапазоне частичных нагрузок эти двигатели могут работать при значительно более высоком коэффициенте избытка воздуха (до $\lambda = 4$)

Для нормальной работы трехкомпонентного каталитического нейтрализатора необходимо точное соблюдение $\lambda = 1$ при нормальной рабочей температуре двигателя. Выполнение этого условия возможно при обеспечении точной дозировки массы поступающего воздуха, включая и возможные добавки.

Для получения оптимального процесса сгорания в двигателях с системой впрыска топлива во впускной трубопровод необходимо обеспечивать не только впрыск точного количества топлива, но и однородность топливно-воздушной смеси, что достигается эффективным распылением топлива. Если эти условия не соблюдаются, во впускном трубопроводе или на стенках камеры сгорания образуются большие капли топлива, которые полностью не сгорают, что приводит к повышенным выбросам несгоревших углеводородов.

Системы смесеобразования

Системы впрыска топлива или карбюраторы служат для приготовления топливно-воздушной смеси, наилучшим образом обеспечивающей эффективную работу двигателя в заданном режиме. Системы впрыска топлива, особенно их электронные версии, лучше приспособлены для получения оптимальных режимов. Они позволяют снизить расход топлива и повысить эффективную мощность двигателя. Все более строгие требования в отношении снижения токсичности отработавших газов заставили производителей автомобилей практически полностью отказаться от карбюраторных топливных систем и перейти на электронные системы впрыска топлива.

До начала этого столетия в автомобильной промышленности практически исключительно использовались системы, в которых смесеобразование происходит вне камеры сгорания (система с впрыском топлива во впускной трубопровод, см. рис. 3, а). В настоящее время все шире применяются системы с внутренним смесеобразованием, т.е с прямым впрыском топлива в камеру сгорания (система прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей, см. рис. 3, b), позволяющие еще больше снизить расход топлива и повысить выходную мощность двигателя.

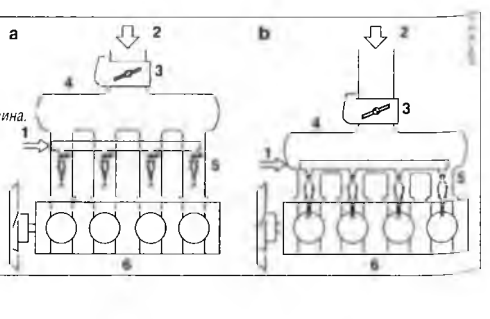


Рис. 3. Схематическое изображение систем впрыска топлива:
a – система с впрыском топлива во впускной трубопровод,
b – система прямого впрыска бензина.
1 – топливо,
2 – воздух,
3 – дроссельный узел,
4 – впускной трубопровод,
5 – топливная форсунка,
6 – двигатель,
7 – топливная форсунка высокого давления

Система с впрыском топлива во впускной трубопровод

В системах впрыска топлива с внешним смесеобразованием приготовление топливно-воздушной смеси происходит вне камеры сгорания двигателя (во впускном трубопроводе). Несмотря на то, что в карбюраторных системах также имеет место внешнее смесеобразование, они были практически полностью вытеснены топливными системами с впрыском топлива во впускной трубопровод, которые обеспечивают более точное дозирование и управление подачей топлива. Последние достижения представлены электронными системами с впрыском топлива во впускной трубопровод, в которых топливо впрыскивается прерывисто для каждого отдельного цилиндра, т.е. с впрыском топлива непосредственно перед впускными клапанами (см. рис. 4).

Системы, основанные на непрерывном впрыске топлива (K-Jetronic) или системы с центральным впрыском топлива перед дроссельной заслонкой (Mono-Jetronic) практически не находят применения в новых разработках.

В связи с высокими требованиями к плавности работы двигателя и снижению токсичности отработавших газов чрезвычайно большое значение имеет точное смесеобразование. При этом также крайне важно обеспечить точную синхронизацию впрыска топлива и точное дозирование топлива. Для выполнения этих требований в электронных системах многоточечного (распределенного) впрыска топлива на каждый цилиндр двигателя приходится по электромагнитной форсунке, причем управление каждой форсункой осуществляется индивидуально. При этом перед блоком управления двигателем стоит задача вычисления как требуемой для каждого цилиндра массы топлива, так и момента начала впрыска топлива в зависимости от текущих условий работы двигателя. Время, требующееся для впрыска вычисленной массы топлива, зависит от сечения канала форсунки и перепада давления между впускным трубопроводом и системой подачи топлива.

В системах с впрыском топлива во впускной трубопровод топливо, подаваемое электроприводным топливным насосом, проходит через топливный фильтр и по топливопроводу поступает в топливную рампу, обеспечивающую его равномерное распределение по топливным форсункам. Для обеспечения надлежащего качества топливно-воздушной смеси чрезвычайно важным является то, каким образом происходит приготовление топлива форсунками. При этом важно обеспечить очень тонкое распыление топлива. Форма и угол рассеивания струи топлива адаптированы к геометрической форме впускного трубопровода и головки цилиндра (см. «Топливная форсунка»).

Рис. 4. Принцип действия системы с впрыском топлива во впускной трубопровод
1 – цилиндр и поршень; 2 – выпускные клапаны; 3 – катушка зажигания со свечой зажигания; 4 – впускные клапаны; 5 – топливная форсунка; 6 – впускной трубопровод

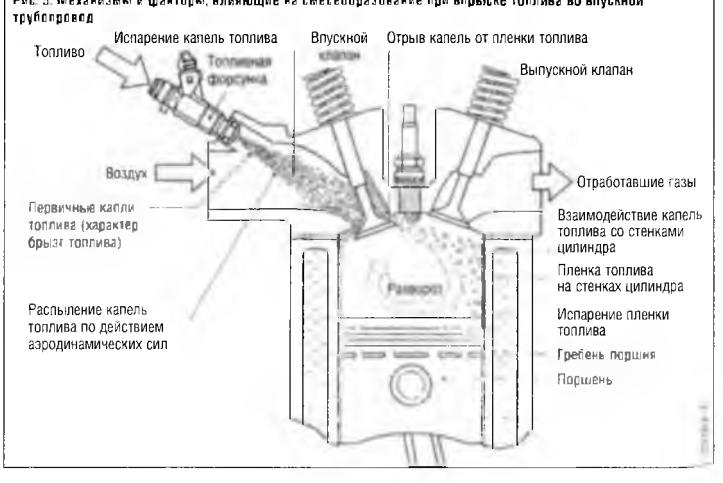


Если точно дозированную массу топлива впрыскивать непосредственно перед впускным клапаном (клапанами) цилиндра, значительная часть тонко распыленного топлива может испариться. Поэтому топливно-воздушная смесь может образовываться в нужный момент времени с использованием воздуха, проходящего через дроссельную заслонку (см. рис. 5). Время, имеющееся в наличии для смесеобразования, может быть увеличено за счет впрыска топлива через пока что закрытые впускные клапаны.

Часть топлива осаждается на стенках цилиндра вблизи впускных клапанов и образует пленку. Толщина этой пленки в основном зависит от давления во впускном трубопроводе и, соответственно, от условий нагрузки двигателя. В случае нестационарного (переходного) режима работы двигателя это осаждение топлива может привести к временному отклонению коэффициента избытка воздуха от желаемого значения ($\lambda = 1$). Отсюда следует, что осаждение топлива на стенках цилиндра необходимо свести к минимуму. Также не следует пренебрегать эффектом осаждения топлива во впускном канале, особенно при пуске холодного двигателя. Поскольку в этих условиях топливо испаряется плохо, для создания воспламеняемой топливно-воздушной смеси первоначально требуется большее количество топлива. Когда в дальнейшем давление топлива во впускном трубопроводе снижается, часть ранее образовавшейся пленки топлива испаряется. Если каталитический нейтрализатор не достиг нормальной рабочей температуры, это может вызывать увеличение выбросов углеводородов. К образованию пленки топлива на стенках камеры сгорания также могут привести нарушения впрыска топлива, что в свою очередь, может вызвать увеличение количества токсичных веществ в отработавших газах. Определение геометрического совмещения струи топлива («нацеливания струи») позволит выбрать соответствующие форсунки, при использовании которых конденсация топлива в областях впускного канала и впускных клапанов будет сведена к минимуму.

По сравнению с карбюраторными системами и одноточечными системами впрыска топлива в многоточечных системах впрыска топлива конденсация топлива на стенках впускного трубопровода значительно снижена. В то же время впускные трубопроводы могут быть оптимально адаптированы, в соответствии с потоком воздуха, горению топлива и получению необходимой динамики двигателя.

Рис. 5. Механизмы и факторы, влияющие на смесеобразование при впрыске топлива во впускной трубопровод



Системы прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей

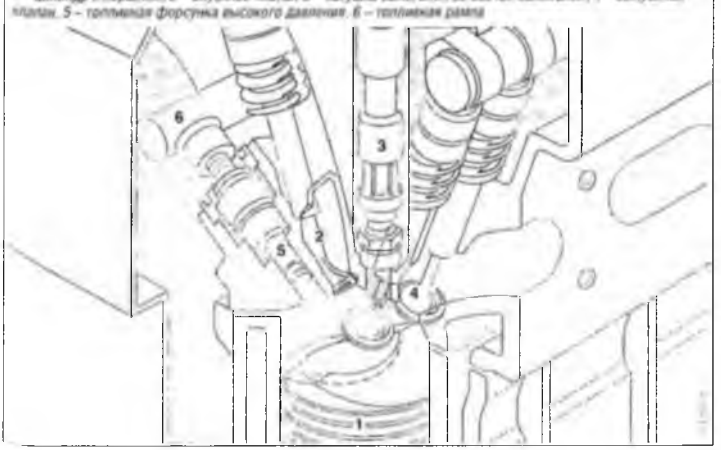
В системах прямого впрыска топлива, в отличие от систем с впрыском топлива во впускной трубопровод, в камеру сгорания через впускные клапаны поступает чистый воздух. Только после этого топливо впрыскивается в камеру сгорания форсункой (топливная форсунка высокого давления), расположенной непосредственно в головке блока цилиндров (внутреннее смесеобразование, см. рис. 6). При этом существуют два основных режима работы системы. В случае впрыска топлива во время такта впуска имеет место режим работы с однородной смесью, а при впрыске топлива во время такта сжатия – режим послойного распределения смеси. Существуют также различные специальные режимы, представляющие собой комбинацию двух основных режимов или их небольшие вариации.

При работе в режиме послойного распределения заряда количество воздуха не ограничивается, топливно-воздушная смесь – бедная. Избыточное количество воздуха в отработавших газах мешает преобразованию оксидов азота в трехкомпонентном каталитическом нейтрализаторе. Поэтому для этих систем прямого впрыска топлива требуется очистка отработавших газов при помощи дополнительного каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа. По этой причине большинство систем прямого впрыска топлива, представленных в настоящее время на рынке, работают исключительно в режиме образования однородной смеси.

Работа двигателя при наличии однородной смеси

При работе в режиме образования однородной смеси, процесс смесеобразования подобен процессу в системе с впрыском топлива во впускной трубопровод. Смесь имеет стехиометрический состав ($\lambda = 1$). Однако, в отношении смесеобразования имеются некоторые различия. В частности, отсутствует поток в области расположения впускного клапана, способствующий смесеобразованию, и для самого смесеобразования имеется значительно меньше времени. В то время как в случае системы с впрыском топлива во впускной трубопровод впрыск может производиться в течение поворота коленчатого вала на 720° (синхронно с тактами впуска), в случае систем с прямым впрыском топлива имеется окно для впрыска, соответствующее углу поворота коленчатого вала всего лишь 180°. Впрыск топлива разрешен только во время такта впуска. Это обусловлено тем, что перед этим выпускные

Рис. 6. Принцип действия системы прямого впрыска топлива:
1 – цилиндр с поршнем, 2 – впускной клапан, 3 – катушка зажигания со свечой зажигания, 4 – выпускной клапан, 5 – топливная форсунка высокого давления, 6 – топливная рампа



клапаны открыты, и в противном случае несгоревшее топливо будет выходить в систему выпуска отработавших газов. Это вызвало бы высокое содержание углеводородов в отработавших газах и проблемы в работе каталитического нейтрализатора. Для обеспечения подачи достаточного количества топлива в течение этого ограниченного периода времени необходимо увеличить поток топлива через форсунку. Это достигается в основном за счет увеличения давления топлива. Увеличение давления дает дополнительное преимущество, заключающееся в повышении уровня турбулентности в камере сгорания, что в свою очередь способствует процессу смесеобразования. Поэтому топливо и воздух могут быть полностью перемешаны, несмотря на короткий отпущенный для этого период времени.

Работа двигателя при послойном распределении смеси

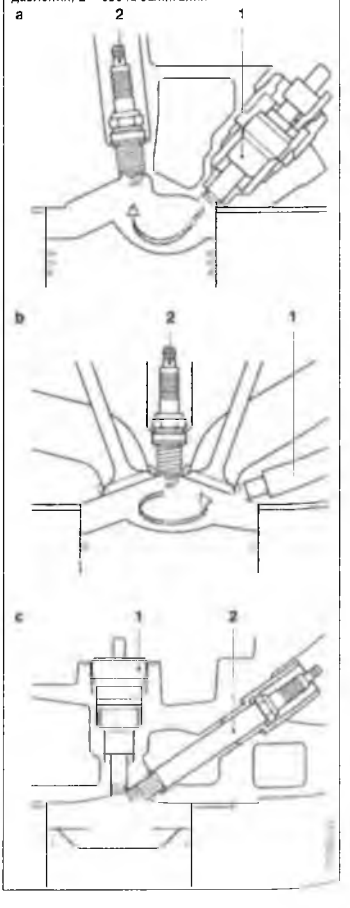
Что касается работы с послойным распределением смеси, следует провести различия между разными способами сжигания топлива. Эти способы имеют одну общую черту, заключающуюся в том, что все они направлены на создание послойного распределения смеси. Это означает, что вместо поддержания стехиомерического состава смеси за счет изменения положения дроссельной заслонки в камеру сгорания поступает полный поток воздуха, но только часть его смешивается с топливом перед подачей смеси к свече зажигания. Остальная часть свежего воздуха окружает послойный заряд топлива. В дополнение к охлаждающему эффекту, снижающему склонность к детонации, отсутствие дросселирования также предлагает значительный потенциал снижения расхода топлива.

Система с направлением струи топлива на днище поршня

В системе с направлением струи топлива на днище поршня топливо впрыскивается в камеру сгорания сбоку (см. рис. 7, а). Выемка в днище поршня отклоняет струю топлива в направлении свечи зажигания. Смесеобразование происходит на пути от форсунки к свече зажигания. Поскольку время смесеобразования в этом случае еще меньше, давление топлива для этой системы должно быть еще выше, чем для работы с однородной смесью. Повышение давления топлива сокращает время впрыска и улучшает условия смесеобразования за счет усиления отражения импульсов давления.

К недостаткам этой системы можно отнести конденсацию топлива на днище поршня, вызывающую увеличение содержания НС в отрабо-

Рис. 7. Смесеобразование для систем прямого впрыска топлива:
а – система с направлением струи топлива на днище поршня; b – система с направлением струи топлива в поток завихрения воздуха; с – система с прямым направлением струи топлива; 1 – топливная форсунка высокого давления, 2 – свеча зажигания



тавших газах. Поскольку время смесеобразования невелико, при высоких нагрузках двигателя облако заряда смеси обычно содержит зоны богатой смеси, что увеличивает вероятность отложения нагара. При низких нагрузках импульс потока топлива, служащий в качестве средства транспортировки послойного заряда топлива к свече зажигания, имеет низкую энергию. Поэтому обычно поток в этом случае должен быть ограничен, чтобы количество топлива соответствовало более низкой плотности воздуха.

Система с направлением струи топлива в поток завихрения воздуха

В основном система с направлением струи топлива в поток завихрения воздуха аналогична системе с направлением струи топлива на днище поршня. Основное различие состоит в том, что облако топлива не взаимодействует непосредственно с выемкой в днище поршня. Вместо этого оно перемещается в поток завихрения воздуха (см. рис. 7, b). Это решает проблему конденсации топлива на выемке поршня. Однако система с направлением струи топлива в поток завихрения воздуха менее стабильна по сравнению с системой с направлением струи на днище, в связи с тем что обеспечить точную повторяемость распределения потока воздуха весьма затруднительно.

Зачастую фактический процесс сгорания топлива, в зависимости от рабочей точки двигателя, представляет собой некоторую комбинацию двух вышеописанных режимов.

Система с прямым направлением струи топлива

Система с прямым направлением струи топлива отличается от двух вышеописанных систем местом установки форсунки. Форсунка установлена по центру вверху и впрыскивает топливо в камеру сгорания в вертикальном направлении (см. рис. 7, c). Свеча зажигания находится рядом с форсункой. Струя топлива не отклоняется и поджигается сразу же после впрыска. В результате время смесеобразования очень непродолжительное. Это требует еще более высокого давления топлива. Такой процесс сгорания топлива позволяет устранить проблемы конденсации топлива на стенках впускного трубопровода, зависимости от потока воздуха и ограничения потока при низких нагрузках. Поэтому он несет в себе самый высокий потенциал снижения расхода топлива. В то же время большую проблему для систем впрыска топлива и зажигания представляет очень короткое время, доступное для смесеобразования.

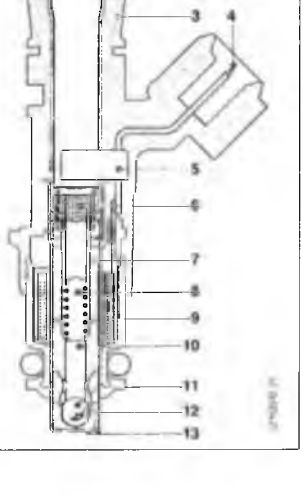
Другие режимы работы

В дополнение к режимам работы с однородной смесью и с послойным распределением смеси могут иметь место определенные специальные режимы. К ним относятся «переключение режимов» (однородная смесь – послойное распределение заряда), «прогрев каталитического нейтрализатора», «режим защиты от детонации» (режим разделения однородной смеси) и «режим работы на обедненной однородной смеси».

Компоненты системы смесеобразования

Компоненты системы смесеобразования должны обеспечивать надлежащее образование топливно-воздушной смеси при использовании той или иной системы впрыска топлива. В системе с впрыском топлива во впускной коллек-

Рис. 8: Топливная форсунка EV 14 (Bosch) для систем с впрыском топлива во впускной трубопровод:
1 – гидравлический канал; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – корпус клапана, 4 – электрический вывод; 5 – пластмассовый зажим со штифтами, 6 – сетчатый фильтр, 7 – внутренний полюс, 8 – пружина клапана; 9 – катушка электромагнита, 10 – игла клапана с якорем, 11 – шарик клапана; 12 – седло клапана; 13 – распылительная пластина с отверстиями



тор это в основном задача топливного инжектора, в то время как в системе прямого впрыска топлива может быть установлена дополнительная заслонка для повышения турбулентности.

Форсунка для систем с впрыском топлива во впускной трубопровод

Конструкция и функция

Электромагнитная форсунка включает следующие основные компоненты (см. рис. 8):

- корпус клапана с электрическим и гидравлическим соединителями;
- электромагнитная катушка;
- игольчатый клапан с якорем электромагнита и шариком клапана;
- седло клапана с диафрагмой;
- пружина клапана.

Фильтр на впуске топлива защищает форсунку от загрязнений. Уплотнительное кольцо (круглого сечения) на гидравлическом соединителе служит для уплотнения форсунки в топливной рампе. Нижнее уплотнительное кольцо обеспечивает уплотнение между форсункой и впускным трубопроводом.

Когда катушка электромагнита обесточена, шарик игольчатого клапана прижимается к седлу конической формы пружиной и усилием, создаваемым давлением топлива. При этом система подачи топлива изолирована от впускного трубопровода.

Когда на катушку электромагнита подается электрическое питание, создается магнитное поле, притягивающее якорь электромагнита игольчатого клапана. Шарик клапана поднимается над седлом, и происходит впрыск топлива. Когда катушка обесточивается, игольчатый клапан закрывается под действием усилия пружины.

Топливо распыляется пластиной с отверстиями. Для лучшего распыления топлива ранее использовавшиеся распылительные пластины с четырьмя отверстиями были заменены на распылительные пластины с большим количеством отверстий (до двенадцати). Штампованные диафрагмы обеспечивают хорошую стабильность количества впрыскиваемого топлива. Форма струи топлива, выходящей из форсунки, определяется количеством отверстий в распылительной пластине и их конфигурацией.

Количество топлива, впрыскиваемое за единицу времени, определяется в основном предварительным давлением в системе подачи топлива, противодавлением во впускном трубопроводе и геометрией области выпуска топлива

Образование и направление струи топлива

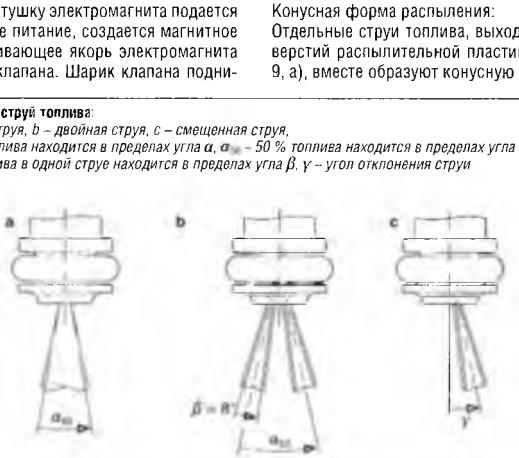
Процесс образования струи топлива, т.е. ее форма, угол рассеивания и размер капель топлива оказывают влияние на образование топливно-воздушной смеси. Различная геометрия впускного трубопровода и головки блока цилиндров вызывают необходимость в создании струй топлива различной формы. Различные варианты формы струи топлива показаны ниже.

Конусная форма распыления:

Отдельные струи топлива, выходящие из отверстий распылительной пластины (см. рис. 9, а), вместе образуют конусную струю.

Рис. 9. Формы струй топлива:

a – конусная струя, b – двойная струя, c – смещенная струя,
α_{80} – 80 % топлива находится в пределах угла α, α_{50} – 50 % топлива находится в пределах угла α:
β – 70 % топлива в одной струе находится в пределах угла β, γ – угол отклонения струи



Форсунки, обеспечивающие конусную форму струи топлива, обычно устанавливаются на двигателях с одним впускным клапаном на каждый цилиндр. Однако они могут использоваться и на двигателях с двумя впускными клапанами на одном цилиндре.

Двухструйная форсунка:
Двухструйные форсунки (см. рис. 9, b) часто используются на двигателях с двумя впускными клапанами на одном цилиндре. Отверстия в распылительной пластине расположены таким образом, что из форсунки выходят две конусные струи, направленные к соответствующим впускным клапанам или на перегородку между впускными клапанами.

Форсунка с угловым отклонением струи:
Струя топлива выходит из форсунки под углом к ее оси (см. рис. 9, c).

Такие форсунки в основном используются, когда конструктивные особенности камеры сгорания не позволяют использовать форсунку с соосным направлением струи.

Электрическая активация форсунки
Выходной модуль в блоке управления двигателем приводит форсунку в действие, подавая на нее соответствующий сигнал (см. рис. 10, a). При подаче напряжения электрический ток в катушке электромагнита возрастает (см. рис. 10, b), что вызывает подъем игольчатого клапана (см. рис. 10, c). Максимальный подъем клапана достигается по истечении времени подъема. Впрыск топлива начинается, как только шарик клапана выходит из седла. Зависимость количества впрыскиваемого топлива от времени показана на рис. 10, d.

Поскольку после обесточивания катушки магнитное поле не исчезает мгновенно, клапан закрывается с задержкой. Клапан полностью закрывается по истечении времени отпадания.

Нелинейность характеристики на участках открытия и отпадания клапана форсунки должна быть скомпенсирована в течение периода открытого состояния форсунки (время впрыска). Скорость подъема шарика клапана также зависит от напряжения аккумуляторной батареи. Влияние напряжения компенсируется посредством коррекции продолжительности впрыска.

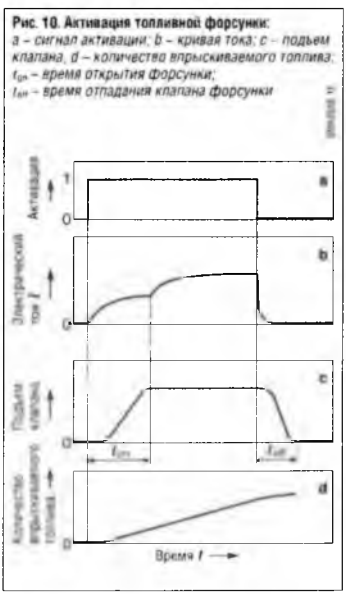
Форсунка высокого давления
В связи с тем, что для систем прямого впрыска топлива требуется более высокое давление, форсунка должна отвечать дополнительным требованиям. Для систем прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей были разработаны специальные топливные форсунки высокого давления.

Функции
Функциями форсунки высокого давления являются дозирование и распыление топлива. Распыление топлива необходимо для смешивания топлива с воздухом в камере сгорания. В зависимости от режима работы топливо концентрируется вблизи свечи зажигания (послойный заряд) или равномерно распределяется во всем объеме камеры сгорания (однородное распределение).

Чтобы обеспечить оптимальное смесеобразование, топливо впрыскивается под давлением до 200 бар. Требуемое количество топлива разделяется на несколько коротких впрысков.

Конструкция и функция
Топливная форсунка высокого давления (см. рис. 11) состоит из корпуса, седла клапана, игольчатого клапана с якорем электромагнита, пружины и катушки электромагнита.

Рис. 10. Активация топливной форсунки:
a – сигнал активации; b – кривая тока; c – подъем клапана; d – количество впрыскиваемого топлива; t_{on} – время открытия форсунки; t_{off} – время отпадания клапана форсунки



При протекании через катушку электрического тока создается магнитное поле, которое поднимает игольчатый клапан из седла, преодолевая усилие пружины. При этом открывается выпускное отверстие клапана. Поскольку давление топлива значительно выше давления в камере сгорания, топливо впрыскивается в камеру сгорания. Тонкое распыление топлива обеспечивается за счет надлежащей геометрии сопла на конце форсунки.

Когда катушка обесточивается, игла клапана прижимается пружиной к седлу и перекрывает подачу топлива.

Поскольку игольчатый клапан открывается внутрь, процессу закрытия способствует давление, имеющееся в топливной рампе. В то же время во время открытия клапана это давление действует в направлении, противоположном направлению открытия. В результате для этих форсунок требуется более сильное магнитное поле, чем для обычных топливных форсунок для систем с впрыском топлива во впускной трубопровод.

Образование струи топлива

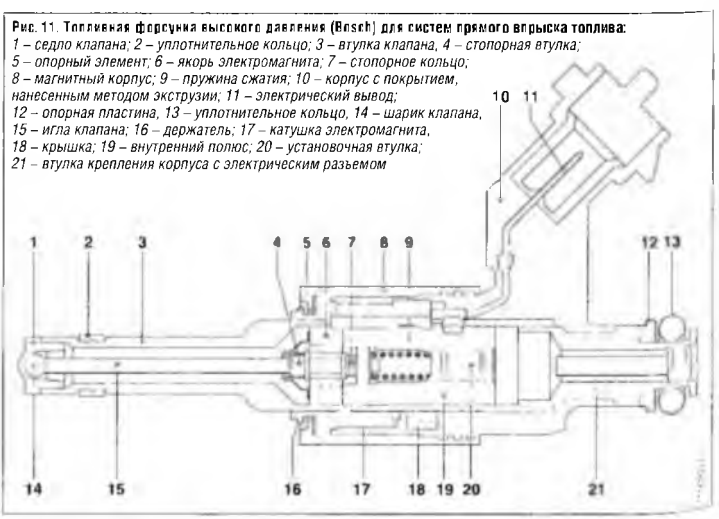
Точное дозирование топлива может осуществляться за счет открытия клапана и удержания его с полностью поднятой иглой в течение определенного времени. Количество впрыскиваемого топлива зависит от давления в топливной рампе, противодавления в камере сгорания и времени открытия клапана. Распыление топлива обеспечивается соответствующей геометрией седла клапана и направляющей потока, служащей для создания завихрений.

В топливных форсунках второго поколения завихряющие клапаны с одним отверстием, создающие «полую» коническую струю, заменены клапанами с несколькими отверстиями, имеющими намного лучшие характеристики в отношении формы струи, тонкости распыления топлива, распределения отдельных струй по массе топлива и т.д. Эти форсунки обеспечивают адаптацию отдельных струй топлива к геометрии камеры сгорания (нацеливание струи), что позволяет повысить рабочие характеристики двигателя, снизить токсичность отработавших газов, обеспечить более ровную работу двигателя и т.д.

Активация топливной форсунки высокого давления

Чтобы обеспечить надежный и повторяемый впрыск, электрический ток, протекающий по катушке, должен иметь определенную достаточно сложную форму. Сигнал включения форсунки выдает микропроцессор блока управления двигателем (см. рис. 12, а). В соответствии с этим сигналом выходной модуль

Рис. 11. Топливная форсунка высокого давления (Bosch) для систем прямого впрыска топлива:
1 – седло клапана; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – втулка клапана, 4 – стопорная втулка; 5 – опорный элемент; 6 – якорь электромагнита; 7 – стопорное кольцо; 8 – магнитный корпус; 9 – пружина сжатия; 10 – корпус с покрытием, нанесенным методом экструзии; 11 – электрический вывод; 12 – опорная пластина, 13 – уплотнительное кольцо, 14 – шарик клапана, 15 – игла клапана; 16 – держатель; 17 – катушка электромагнита, 18 – крышка; 19 – внутренний полюс; 20 – установочная втулка; 21 – втулка крепления корпуса с электрическим разъемом



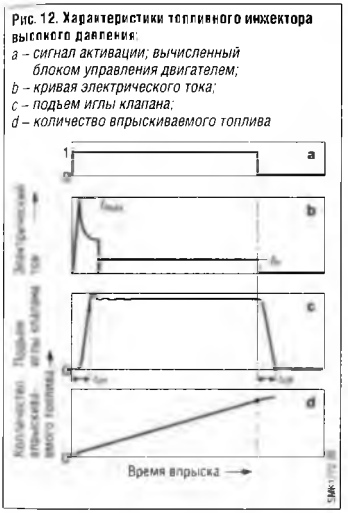


Рис. 12. Характеристики топливного инжектора высокого давления:
a – сигнал активации; вычисленный блоком управления двигателем;
b – кривая электрического тока;
c – подъем иглы клапана;
d – количество впрыскиваемого топлива

блока генерирует импульс тока определенной формы (см. рис. 12, b).

Преобразователь постоянного напряжения в блоке управления двигателем генерирует бустерное напряжение величиной 65 В. Это напряжение необходимо для как можно более быстрого создания высокого электрического тока на начальной стадии. Это необходимо, чтобы как можно быстрее поднять иглу клапана. На этой стадии игла клапана достигает положения максимального подъема (см. рис. 12, c). Когда форсунка будет полностью открыта, для ее удержания в открытом положении достаточно значительно меньшего электрического тока (ток удержания). При постоянном подъеме иглы клапана количество впрыскиваемого топлива пропорционально продолжительности впрыска (см. рис. 12, d).

Завихряющая заслонка

В системах прямого впрыска топлива имеющееся в наличии время смесеобразования значительно меньше, чем в системах с впрыском топлива во впускной трубопровод. Для обеспечения достаточно хорошего смесеобразования в течение этого короткого периода, прежде всего при малых частотах вращения коленчатого вала, в системах прямого впрыска топлива иногда применяются



Рис. 13. Завихряющая заслонка:
1 – впускной трубопровод;
2 – дроссельная заслонка;
3 – завихряющая заслонка;
4 – перегородка;
5 – впускной клапан

завихряющие заслонки. Они располагаются перед впускными клапанами (см. рис. 13) и обычно находятся в горизонтальном положении. Будучи закрытой, завихряющая заслонка ускоряет движение заряда, тем самым способствуя смешиванию воздуха и топлива в камере сгорания. Кроме того, повышение турбулентности потока позволяет увеличить скорость сгорания топлива, тем самым, оказывает положительное влияние на расход топлива и плавность работы двигателя.

Имеются два различных вида завихряющих заслонок: с двухступенчатой конструкцией и работающих в непрерывном режиме.

Зажигание

Основные принципы

Функция

В двигателе с искровым зажиганием (SI) процесс сгорания топлива инициируется внешним зажиганием. Поджиг сжатой топливо-воздушной смеси в нужный момент времени осуществляется системой зажигания. Зажигание осуществляется электрической искрой, образуемой между электродами свечи зажигания в камере сгорания.

Стабильное, надежное зажигание при любых условиях абсолютно необходимо для обеспечения бесперебойной работы двигателя. Сбои в системе зажигания вызывают:
- пропуски зажигания смеси;
- повреждение или разрушение каталитического нейтрализатора;
- увеличение содержания токсичных веществ в отработавших газах;
- увеличение расхода топлива;
- снижение эффективной мощности двигателя.

Искровое зажигание

Электрическая искра может возникнуть на свече зажигания только по достижении необходимого напряжения зажигания (см. рис. 1). Напряжение зажигания зависит от зазора между электродами свечи зажигания и плотности топливно-воздушной смеси на момент зажигания. После электрического пробоя напряжение на свече зажигания снижается до напряжения горения искры. Напряжение горения искры зависит от длины искры (определяемой зазором между электродами и отклонением искры потоком топливно-воздушной смеси).

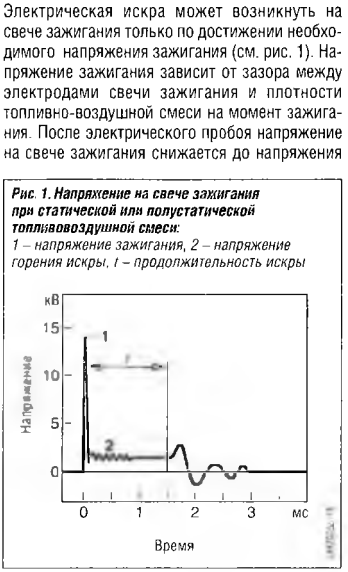


Рис. 1. Напряжение на свече зажигания при статической или полустатической топливовоздушной смеси:
1 – напряжение зажигания, 2 – напряжение горения искры, t – продолжительность искры

В течение времени горения искры энергия, запасенная в системе зажигания, преобразуется в искру зажигания. Затем искра гаснет, и напряжение спадает до нуля.

Смесеобразование и энергия зажигания

Электрическая искра между электродами свечи зажигания создает высокотемпературную плазму. При наличии смеси соответствующего состава в области свечи зажигания и при подаче системой зажигания достаточного количества энергии дуга создает фронт пламени, который затем распространяется независимо.

Система зажигания должна обеспечивать этот процесс при любых условиях работы двигателя. При идеальных условиях, когда топливно-воздушная смесь неподвижна, однородна и имеет стехиометрический состав, для каждого отдельного процесса зажигания требуется количество энергии, равное 0,2 мДж. В реальных условиях работы двигателя требуется значительно больше энергии. Некоторая часть энергии искры преобразуется во время пробоя, а оставшаяся часть – во время горения искры.

При увеличении зазора между электродами искра увеличивается, однако для этого требуется более высокое напряжение зажигания. При бедной топливно-воздушной смеси или на двигателях с наддувом также требуется увеличенное напряжение зажигания. При данном уровне энергии продолжительность искры при увеличении напряжения зажигания уменьшается. Как правило, более продолжительная искра стабилизирует процесс горения топлива; неоднородность смеси в области свечи в момент зажигания может быть скомпенсирована за счет увеличения продолжительности искры. Турбулентность топливно-воздушной смеси подобная турбулентности, имеющей место в режиме послойного распределения заряда топлива, может вызвать значительное отклонение искры, приводящее к ее погасанию. Для повторного зажигания топливно-воздушной смеси требуются многоискровые системы зажигания.

Необходимость в более высоких напряжениях зажигания, большей продолжитель-

ности искры и обеспечении многоискрового зажигания вызвала создание систем с более высокой энергией зажигания. Недостаточная энергия зажигания является причиной пропусков зажигания топлива. Поэтому система зажигания должна обеспечивать достаточное количество энергии при любых условиях работы двигателя.

Эффективное распыление топлива и свободный доступ топливно-воздушной смеси к искре повышают воспламеняемость смеси и способствуют увеличению продолжительности и длины искры. Расположение и длина искры определяются размерами свечи зажигания. Продолжительность искры зависит от типа и конструкции системы зажигания, а также от условий в камере сгорания. В зависимости от особенностей двигателя (впрыск топлива во впускной трубопровод, прямой впрыск топлива или наличие наддува) требуемая энергия искры составляет от 30 до 100 мДж.

Момент зажигания

Начало сгорания топлива в двигателе внутреннего сгорания определяется моментом зажигания. Момент зажигания всегда указывается относительно верхней мертвой точки поршня. Самый ранний возможный момент зажигания определяется пределом возникновения детонации, а самый поздний – пределом воспламеняемости смеси или максимальной допустимой температурой отработавших газов. Момент зажигания оказывает влияние на:

- крутящий момент двигателя;
- состав отработавших газов;
- расход топлива.

Базовая точка зажигания

Скорость распространения фронта пламени в камере сгорания увеличивается при увеличении заряда смеси в цилиндре и частоты вращения коленчатого вала. Для создания максимального крутящего момента двигателя максимальная скорость сгорания и, следовательно, максимальное давление продуктов горения должны достигаться вскоре после прохождения поршнем верхней мертвой точки (см. рис. 2). Следовательно, зажигание должно происходить до верхней мертвой точки, и момент зажигания должен сдвигаться в сторону опережения по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала или уменьшения заряда смеси.

Также момент зажигания должен быть сдвинут в сторону опережения в случае бедной топливно-воздушной смеси ($\lambda > 1$), поскольку в этом случае имеет место более низкая скорость распространения фронта пламени. Таким образом, установка момента зажигания зависит от частоты вращения коленчатого вала, величины заряда смеси и состава смеси (коэффициента избытка воздуха λ) Моменты опережения зажигания определяются на испытательном стенде, и в случае электронных систем управления двигателем сохраняются в программной памяти блока управления (см. рис. 3).



Рис. 2 Характеристика давления в камере сгорания в зависимости от момента опережения зажигания:
1 – номинальный момент опережения зажигания (Z_n);
2 – ранний момент опережения зажигания (Z_b),
3 – поздний момент опережения зажигания (Z_c)



Рис. 3 Диаграмма момента зажигания в функции частоты вращения коленчатого вала и относительной величины заряда воздуха

Коррекция момента опережения зажигания в зависимости от условий работы двигателя

Осуществляя управление моментом опережения зажигания, электронные системы управления двигателем, кроме частоты вращения коленчатого вала, могут учитывать и другие факторы. Базовый момент опережения зажигания может быть изменен посредством аддитивных коррекций или, для определенных рабочих точек или диапазонов, заменен в соответствии со специальными программными таблицами. В качестве примеров аддитивной коррекции можно привести коррекцию момента опережения зажигания для предотвращения детонации, или при работе двигателя с системой прямого впрыска топлива на бедной смеси и во время прогрева. Примерами использования специальных значений угла опережения зажигания или программных таблиц является коррекция угла опережения зажигания в режиме послойного распределения заряда смеси и во время пуска двигателя. Окончательная реализация зависит от архитектуры блока управления двигателем.

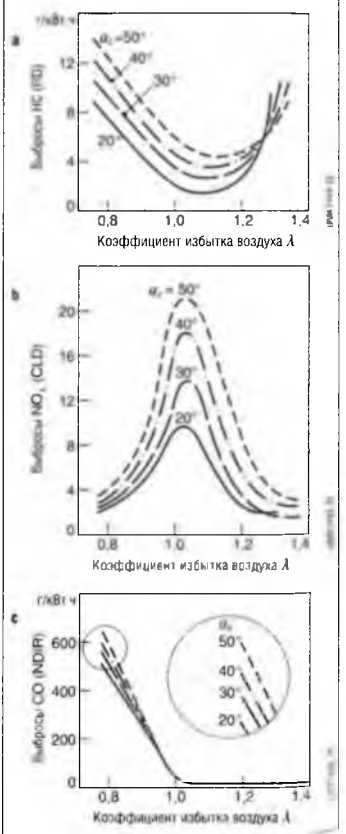
Состав отработавших газов и расход топлива

Момент опережения зажигания оказывает значительное влияние на состав отработавших газов. Однако различные критерии оптимизации, такие как состав отработавших газов, расход топлива, динамика автомобиля и т.д., не всегда могут быть совместимы, поэтому определить «идеальный» момент опережения зажигания не всегда представляется возможным.

Изменения момента опережения зажигания вызывают взаимно противоположные изменения расхода топлива и состава отработавших газов (см. рис. 4 и 5). При увеличении опережения зажигания возрастает мощность двигателя, снижается расход топлива, но также увеличивается содержание в отработавших газах углеводородов и особенно оксидов азота. Слишком большое опережение зажигания может привести к детонации двигателя и, как следствие, к его выходу из строя. Позднее зажигание приводит к повышению температуры отработавших газов, что также негативно влияет на работу двигателя.

Системы электронного управления работой двигателя по программируемым зависимостям изменения момента опережения зажигания обеспечивают его корректировку в соответствии с изменениями таких параметров, как частота вращения коленчатого вала, нагрузка, температура и т.п. Также электронные системы могут использоваться для получения оптимального сочетания взаимоисключающих параметров.

Рис. 4. Влияние коэффициента избытка воздуха λ и момента зажигания α_z на состав отработавших газов:
a – выбросы углеводородов (HC);
b – выбросы оксидов азота (NO_x);
c – выбросы оксида углерода (CO)



Предотвращение детонации

Основные принципы

Электронные системы управления моментом опережения зажигания дают возможность точного регулирования угла опережения зажигания в зависимости частоты вращения коленчатого

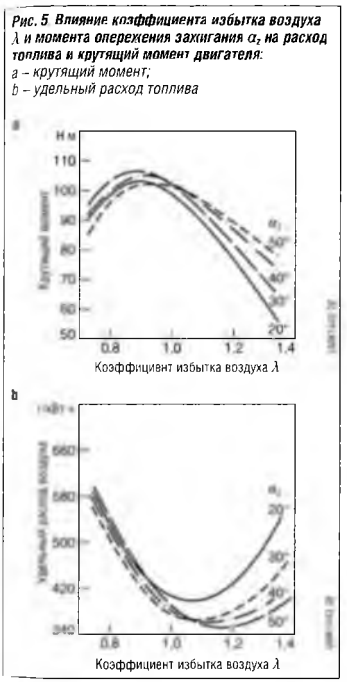


Рис. 5. Влияние коэффициента избытка воздуха λ и момента опережения зажигания α_z на расход топлива и крутящий момент двигателя:
а – крутящий момент;
б – удельный расход топлива

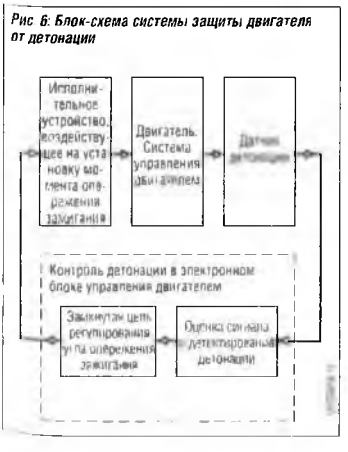


Рис. 6: Блок-схема системы защиты двигателя от детонации

вала, нагрузки, температуры и т.д. Тем не менее, даже при отсутствии специальной системы контроля детонации должны быть предусмотрены средства предельно допустимых значений угла опережения зажигания.

Это необходимо, чтобы даже в экстремальных условиях, касающихся допусков изготовления, износа двигателя, окружающих условий, качества топлива и т.д., ни в одном из цилиндров не могла возникать детонация. В результате приходится снижать степень сжатия и сдвигать момент опережения зажигания в сторону запаздывания, что приводит к увеличению расхода топлива и снижению крутящего момента двигателя.

Этих недостатков позволяет избежать система контроля детонации. Опыт показывает, что эта система позволяет увеличить степень сжатия, значительно снизить расход топлива и повысить крутящий момент. В настоящее время требуемая коррекция угла опережения зажигания должна быть определена не для наихудших, а, напротив, для наилучших возможных условий (например, для минимального разброса допусков, наилучшего качества топлива, для цилиндра, менее всего склонного к детонации и т.д.). Теперь на протяжении всего срока службы двигателя стало возможным управлять каждым отдельным цилиндром таким образом, чтобы при любых условиях он работал вблизи порога детонации, т.е. с максимальной возможной эффективностью. Для создания такой системы особенно важно иметь надежный метод определения детонации. Этот метод должен позволять определять детонацию в каждом цилиндре во всем диапазоне условий работы двигателя, начиная с определенной интенсивности детонации.

Система контроля детонации

Система контроля детонации (см. рис. 6) включает:
- датчик детонации;
- оценка сигнала;
- блок детектирования детонации;
- адаптивную систему регулирования угла зажигания.

Датчик детонации:

Типичным симптомом детонации является высокочастотная вибрация, накладывающаяся на кривую низкого давления в камере сгорания. Лучше всего эта вибрация определяется непосредственно в камере сгорания при помощи датчиков давления. Однако, поскольку установка датчиков давления в головке блока цилиндров для каждого цилиндра все еще связана с высокими дополнительными затратами, эти

вибрации обычно определяются при помощи датчиков детонации, устанавливаемых снаружи двигателя. Эти датчики представляют собой пьезоэлектрические датчики ускорения (см. рис. 7), воспринимающие детонационную вибрацию и преобразующие ее в электрический сигнал.

Существуют датчики детонации двух типов: широкополосный датчик с типичной полосой частот от 5 до 20 кГц и резонансный датчик, передающий сигнал детонации только одной резонансной частоты. Гибкая система оценки сигнала в блоке управления дает возможность оценки различных или нескольких резонансных частот при помощи одного широкополосного датчика детонации. Это повышает надежность системы, в связи с чем в настоящее время в основном применяются широкополосные датчики детонации.

Для надежного определения детонации во всех цилиндрах и при любых условиях работы двигателя количество и расположение датчиков детонации необходимо определить для каждого типа двигателя. На четырехцилиндровых рядных двигателях обычно устанавливают один или два датчика детонации, на 5- и 6-цилиндровых двигателях – два, а на 8- и 12-цилиндровых двигателях – четыре датчика детонации.

Оценка сигнала

Специальный блок оценки сигнала в блоке управления обрабатывает сигнал широкополосного датчика детонации и генерирует показательную переменную для каждого процесса сгорания топлива. Эта чрезвычайно гибкая система оценки сигнала, использующая широкополосный датчик детонации, дает значительно лучшие результаты по сравнению с резонансным датчиком детонации. Это связано с тем, что резонансный датчик передает только одну резонансную частоту для анализа состояния всех цилиндров при любых условиях работы двигателя.

Детектирование детонации

Переменная величина, генерируемая блоком оценки сигнала, классифицируется в алгоритме детектирования детонации как «детонация» или «отсутствие детонации» для каждого цилиндра и каждого процесса сгорания топлива. Это выполняется посредством сравнения величины переменной, характеризующей текущий процесс сгорания топлива с переменной, представляющей процесс без детонации.

Адаптивная система регулирования угла опережения зажигания

В случае детектирования детонации в цилиндре момент опережения зажигания для этого цилиндра сдвигается в сторону запаздывания (см. рис. 8). Когда детонация прекращается, угол опережения зажигания возвращается к ис-

Рис. 7. Датчик детонации:
1 – инерционная масса; 2 – заливка компаундом, 3 – пьезокерамический элемент, 4 – контакты, 5 – электрический вывод

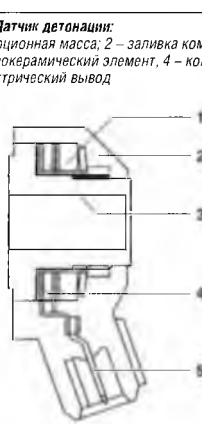


Рис. 8. Система контроля детонации
Алгоритм регулирования момента зажигания на 4-цилиндровом двигателе. $K_{1...3}$ – возникновение детонации в цилиндрах 1–3 при отсутствии детонации в цилиндре 4, a – время выдержки перед сдвигом момента опережения зажигания в сторону запаздывания, b – сдвиг момента опережения зажигания в сторону запаздывания, c – время задержки перед возвратом к первоначальному моменту опережения зажигания (в сторону опережения), d – опережение зажигания



Такты сгорания
в отдельных цилиндрах →

ходному значению. Алгоритмы детектирования детонации и регулирования угла опережения зажигания согласованы таким образом, чтобы исключить слышимую и вредную для двигателя детонацию, несмотря на то, что каждый цилиндр работает вблизи предела детонации в пределах диапазона оптимальной эффективности.

В реальных условиях работы двигателя имеют место различные пределы детонации для отдельных цилиндров, что требует для них различных моментов опережения зажигания. Для адаптации момента опережения зажигания к пределу детонации значения запаздывания опережения зажигания для каждого цилиндра и для каждой рабочей точки двигателя записываются в память блока управления. Эти значения для различных нагрузок и частот вращения коленчатого вала заносятся в программные таблицы, которые хранятся в энергонезависимом запоминающем устройстве и в ОЗУ с постоянным питанием. Таким образом, двигатель может работать без детонации с оптимальной эффективностью в любой рабочей точке, а также в условиях быстрого изменения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

Эта адаптация позволяет даже использовать бензин с более низким октановым числом.

Системы зажигания

На современных автомобилях системы зажигания почти всегда представляют собой часть системы управления двигателем. Автономные системы зажигания в настоящее время используются только в некоторых случаях (например, на автомобилях с двигателями малого рабочего объема). В основном применяются системы распределения статического высокого напряжения с отдельными катушками зажигания для каждого цилиндра (индуктивные системы зажигания, см. рис. 10). Значительно реже (на малолитражных двигателях) используются системы зажигания на основе высоковольтных конденсаторов (емкостное зажигание) или специальные конструкции, такие как магнето. В следующем разделе будут рассмотрены только системы с использованием катушек зажигания.

Индуктивные системы зажигания

Принцип действия индуктивной системы зажигания

Контур индуктивной системы зажигания (см. рис. 9) включает:

- катушку зажигания с первичной и вторичной обмотками;
- задающий (усилительный) каскад, как правило на биполярных полевых транзисторах с изолированным затвором (IGBT), встроенный в блок управления двигателем или катушку зажигания. Этот элемент служит для подачи электрического тока на первичную обмотку катушки зажигания и отключения электрического тока.
- свечу зажигания, подключенную к вторичной обмотке катушки зажигания.

Техника безопасности

Все электронные системы зажигания являются системами высокого напряжения. Во избежание любых рисков, перед тем как приступить к работам по обслуживанию систем зажигания всегда выключайте зажигание или отсоединяйте аккумуляторную батарею. Такие работы могут включать:

- замену компонентов системы (свечей зажигания, катушек или трансформаторов зажигания, распределителей зажигания, проводов высокого напряжения и т.д.),
- подсоединение контрольно-измерительных приборов, таких как стробоскопические лампы, измерители угла замкнутого состояния/частоты вращения коленчатого вала, осциллографов и т.д.

Производя проверку системы зажигания, помните, что при включенном зажигании в системе присутствуют опасные высокие напряжения. Все работы должны выполняться только квалифицированным персоналом.

Рис. 9. Структура контура зажигания в системе с отдельными катушками зажигания для каждого цилиндра:
1 – задающий (усилительный) каскад,
2 – катушка зажигания; 3 – диод (для подавления помех от искры); 4 – свеча зажигания, 15, 1, 4, 4а – обозначения выводов;



Перед требуемым моментом зажигания задающий (усилительный) каскад открывается, и через первичную обмотку катушки начинает протекать электрический ток, источником которого является электрическая система автомобиля. В течение времени протекания тока по первичной обмотке (период протекания тока), в первичной обмотке создается магнитное поле.

В момент зажигания электрический ток через первичную обмотку снова прерывается, и энергия магнитного поля разряжается через вторичную обмотку катушки зажигания. В ходе этого процесса во вторичной обмотке генерируется высокое напряжение, которое, в свою очередь, генерирует искру на свече зажигания. Требуемое напряжение зажигания на свече всегда должно быть меньше максимального возможного напряжения, которое может создать система.

После электрического пробоя оставшаяся часть энергии преобразуется на свече зажигания в течение периода горения искры.

Функции индуктивной системы зажигания

Основными функциями индуктивной системы зажигания являются:

- определение момента зажигания;
- определение периода протекания электрического тока в первичной обмотке;
- инициирование зажигания.

Определение момента зажигания

Текущий момент зажигания определяется в каждом случае программным образом, в зависимости от условий работы и эффективной выходной мощности двигателя.

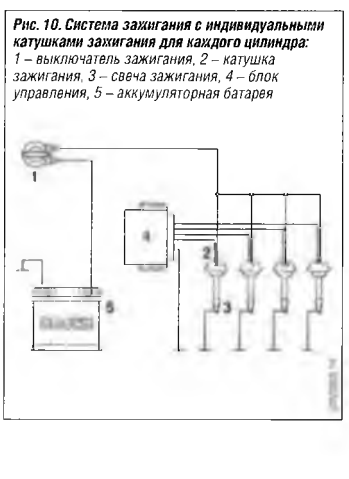


Рис. 10. Система зажигания с индивидуальными катушками зажигания для каждого цилиндра:
1 – выключатель зажигания, 2 – катушка зажигания, 3 – свеча зажигания, 4 – блок управления, 5 – аккумуляторная батарея

Определение периода протекания электрического тока

Требуемая энергия зажигания должна быть доступна в момент зажигания. Количество накопленной энергии зависит от силы электрического тока протекающего через первичную обмотку катушки (тока отсечки) и индуктивности первичной обмотки. Сила тока отсечки, в основном, зависит от времени протекания тока через первичную обмотку и от напряжения в электрической системе автомобиля. Значения периодов протекания тока, требуемых для достижения желаемого тока отсечки содержатся в характеристических кривых или программных таблицах в функции напряжения в установившемся состоянии. Также может быть предусмотрена коррекция периода протекания тока в первичной обмотке в зависимости от температуры.

Инициирование зажигания

Система инициирования зажигания обеспечивает возникновение искры в соответствующем цилиндре в нужный момент времени с требуемым уровнем энергии зажигания. В системах зажигания с электронной системой управления на коленчатом вале закреплен импульсный зубчатый диск (обычно 60 зубцов) с установочной меткой, который сканируется генератором импульсов индуктивного типа (датчиком). По сигналу датчика блок управления вычисляет угол поворота коленчатого вала и моментальную скорость вращения коленчатого вала. Катушка зажигания может быть включена и выключена при любом требуемом положении коленчатого вала. Для системы также требуется дополнительный фазовый сигнал положения распределительного вала для однозначной идентификации цилиндра.

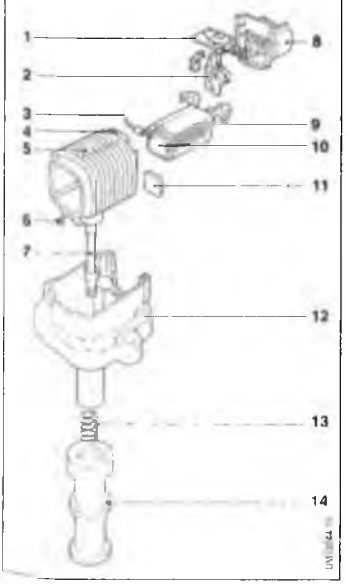
Для каждого процесса сгорания топлива блок управления вычисляет момент включения, исходя из желаемого момента зажигания, периода протекания электрического тока и текущей частоты вращения коленчатого вала, и в этот момент включает задающий (усилительный) каскад. Выключение задающего каскада в соответствии с требуемым моментом зажигания, производится по истечении периода протекания тока или по достижении требуемого угла поворота коленчатого вала.

Катушка зажигания

Функция

Катушка зажигания представляет собой источник высокого напряжения, аналогичный по структуре трансформатору. Энергия подается из электрической системы автомобиля в течение периода протекания электрического тока по первичной обмотке. В момент зажигания, который также является моментом окончания протекания тока, энергия передается в виде высокого напряжения на свечу зажигания (индуктивная система зажигания).

Рис. 1. Конструкция компактной катушки зажигания:
1 – печатная плата (опция) 2 – задающий каскад (опция), 3 – дугогасящий диод (опция), 4 – каркас вторичной обмотки, 5 – вторичная обмотка, 6 – контактная пластина, 7 – высоковольтный стержень (элемент соединения с контактной пружиной); 8 – разъем; 9 – первичная обмотка, 10 – I-образный сердечник, 11 – постоянный магнит, 12 – O-образный сердечник, 13 – контактная пружина (контакт со свечой зажигания); 14 – силиконовая оболочка (высоковольтная изоляция)



Конструкция

Катушка зажигания включает две обмотки, магнитно-связанные друг с другом железным сердечником (см. рис. 1). Для оптимизации энергии этот сердечник может содержать постоянный магнит. Первичная обмотка имеет значительно меньше витков, чем вторичная. Отношение количества витков $\ddot{u}$ составляет 80–150.

Во избежание пробоя или искрового перекрытия обмотки должны иметь хорошую электрическую изоляцию. С этой целью обмотки обычно заливаются в корпусе катушки зажигания эпоксидной смолой.

Как правило, с целью снижения потерь на вихревые токи сердечник набирается из ферромагнитных стальных пластин.

В катушку зажигания также может быть встроен задающий каскад (вместо его установки в блоке управления двигателем). В катушку зажигания также могут быть встроены помехоподавляющие элементы, а также диод отсечки тока высокого напряжения. Кроме того, в цепи высокого напряжения обычно устанавливается помехоподавляющий резистор.

Принцип действия

При включении задающего каскада по первичной обмотке начинает протекать ток. Скорость возрастания тока определяется индуктивностью обмотки. Во время этого процесса энергия запасается в создаваемом магнитном поле. Время включения (заряда) вычисляется таким образом, чтобы к моменту окончания этого периода достигался заданный ток отсечки и, следовательно, требуемый уровень запасенной энергии.

По истечении этого периода ток прерывается задающим каскадом, что вызывает быстрое изменение магнитного потока в сердечнике катушки зажигания. Это изменение вызывает наведение напряжения во вторичной обмотке. Конструкция вторичной обмотки, ее геометрическое расположение относительно сердечника и первичной обмотки и используемые материалы позволяют придавать системе индуктивно-емкостные свойства и получать на вторичной обмотке катушки напряжения до 30 000 В.

После электрического пробоя между электродами свечи зажигания напряжение на свече спадает до напряжения горения искры – величиной около 1000 В. При этом по вторичной обмотке протекает ток искры, который с тече-

нием времени снижается, пока искра не гаснет. К этому моменту вся энергия, запасенная во время процесса зарядки, оказывается полностью израсходованной.

Поскольку после прерывания тока в первичной обмотке ток во вторичной обмотке изменяется во времени, на выходе катушки зажигания индуцируется напряжение, подобное напряжению в начале периода заряда. Однако, это напряжение значительно ниже напряжения в момент зажигания и имеет полярность, противоположную этому напряжению. Чтобы предотвратить возникновение этого «переходного напряжения», которое может вызывать нежелательное зажигание, во вторичной цепи обычно включается высоковольтный диод (подавляющий помехи от искры).

От конструкции катушки зажигания зависят ее электрические характеристики. В этом отношении определяющее значение имеют требования в отношении пространства для установки (например, геометрия головки блока цилиндров и крышки головки и расположение топливной форсунки и впускного трубопровода) и двух интерфейсов катушки – задающего каскада, управляемого блоком управления двигателем, и свечи зажигания

Конструктивные особенности

Существуют катушки зажигания нескольких типов, различающихся по своим конструктивным особенностям.

Кроме индивидуальных катушек, которые обычно крепятся прямо на свечах зажигания, несколько катушек могут быть сгруппированы в одном корпусе, в виде модуля или рампы. Этот модуль может также устанавливаться на свечах зажигания или вблизи них. В последнем случае высокое напряжение подается на свечи при помощи проводов высокого напряжения.

Кроме катушек зажигания с одним выводом высокого напряжения, существуют катушки зажигания, в которых выведены оба конца вторичной обмотки. Во избежание разряда на вторичной обмотке электрическая цепь всегда должна замыкаться через зазоры обеих свечей зажигания. Одним из возможных применений таких катушек является двойное зажигание, т.е. установка на одном цилиндре двух свечей зажигания, подключаемых к одной катушке. Другим возможным применением является подключение двух высоковольтных выводов к двум свечам зажигания, установленным на разных цилиндрах. В этом случае одна из свечей всегда будет находиться в состоянии зажигания. В результате к напряжению и энергии «пассивной искры» (резервной искры) предъявляются намного более низкие требования. Кроме того, это вариант является более дешевым; в то же время он должен быть согласован со всей системой в целом во избежание повреждений, которые могут быть вызваны «пассивными» искрами.

Катушки зажигания различаются также по их базовой конструкции. В качестве примера можно привести компактную катушку зажигания с равносторонним корпусом и магнитопроводом O-I или C-I типа. Корпус катушки крепится на свече зажигания.

Еще один вариант конструкции – стержневая катушка, корпус которой входит в свечу зажигания. Здесь также обмотки располагаются на I-образном или стержневом сердечнике с концентрично расположенной пластиной, служащей в качестве ярма магнита.

В целях разгрузки электронного блока управления двигателем в катушку зажигания может быть встроен силовой задающий каскад. В целях удовлетворения тех или иных требования на катушке зажигания могут быть установлены дополнительные электронные компоненты (см. рис. 2).

Требования

Основные требования, предъявляемые к современным системам зажигания, вытекают из требований к снижению токсичности отработавших газов и расхода топлива. Требования к катушкам зажигания зависят от соответствующих технических решений двигателей, таких как турбонаддув высокого давления и работа в режиме послойного распределения заряда топлива (в системах прямого впрыска топлива с нацеливанием струи) в сочетании с увеличением степени рециркуляции отработавших газов (EGR).

В частности, для современных систем зажигания требуются катушки с более высоким выходным напряжением и повышенной температурной стойкостью. Среди прочего, это может быть достигнуто за счет:

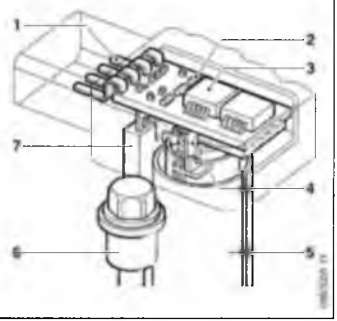
- применения катушек с высокой энергией и высоким выходным напряжением (свыше 40 000 В);
- применения систем многоискрового зажигания (MSI) с электронными системами управления на основе специализированных интегральных схем (ASIC), с измерением тока в первичной и вторичной обмотках.

- диагностических функций (например, мониторинг времени заряда, измерение ионного тока для диагностики процессов сгорания топлива);
- защитных функций (например, тепловая защита или регулирование тока отсечки).

Кроме того, в настоящее время в отношении автомобилей действуют строгие требования к электромагнитной совместимости (EMC). Высокие напряжения зажигания, высокочастотные токи в системах многоискрового зажигания и более высокие токи отсечки требуют принятия мер к снижению уровня помех, создаваемых системой зажигания, во избежание сбоев в работе других компонентов (электронных блоков управления, датчиков, исполнительных устройств).

Все более широкое применение электронных компонентов в катушках зажигания выдвигает более строгие требования к их помехозащищенности. Во избежание сбоев в работе эти электронные системы должны быть невосприимчивы к помехам, создаваемым как самой системой зажигания, так и другими компонентами и системами автомобиля.

Рис. 2. Установка задающего (усиливающего) каскада на катушке зажигания стержневого типа:
1 – электрические выводы; 2 – навесные элементы (компоненты поверхностного монтажа); 3 – электронные устройства, 4 – навесные элементы; 5 – трансформатор катушки зажигания, 6 – крепежный элемент; 7 – задающий каскад



Свеча зажигания

Функция

Свеча зажигания служит для передачи энергии зажигания, выработанной в катушке зажигания, в камеру сгорания. Подаваемое на свечу высокое напряжение создает электрическую искру между электродами свечи, которая зажигает сжатую топливно-воздушную смесь. Поскольку эта функция должна быть обеспечена при самых различных условиях (пуск холодного двигателя, полностью открытая дроссельная заслонка и т.д.), свеча зажигания играет важную роль в обеспечении надежной и оптимальной работы двигателя. Эти требования остаются неизменными на протяжении всего срока службы свечи зажигания.

Требования

Свеча зажигания должна удовлетворять большому количеству разнообразных требований. Она подвергается циклическим воздействиям внутри камеры сгорания, а также факторам внешней среды.

При использовании электронных систем зажигания на свечи подается напряжение до 30 кВ. Эти высокие напряжения не должны вызывать пробой керамического изолятора. Эта изоляция должна быть обеспечена на протяжении всего срока службы и гарантирована при высоких температурах (до 1000 °С).

Свеча зажигания подвергается воздействию высоких давлений (до 100 бар), периодически возникающих в камере сгорания, которые не должны вызывать нарушений герметичности. Кроме того, материалы электродов свечи зажигания должны обладать очень высокой температурной и вибрационной стойкостью. Корпус свечи должен выдерживать большие моменты затяжки без каких-либо деформаций.

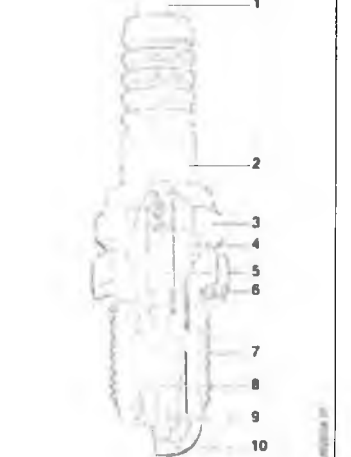
Между тем, та часть свечи зажигания, что входит в камеру сгорания, подвергается воздействию высокотемпературных химических процессов, поэтому свеча должна обладать и свойством сопротивления агрессивным продуктам сгорания (сопротивление высокотемпературной коррозии). Так как свеча подвергается быстрым изменениям температурных режимов (между горячими продуктами сгорания и холодной рабочей смесью), керамический изолятор должен обладать высоким сопротивлением тепловым нагрузкам (тепловому удару). Электроды и изолятор должны хорошо рассеивать тепло, что является важным условием надежной работы свечи

Конструкция

В специальном керамическом изоляторе (Al_2O_3) токопроводящий стеклогерметик образует электрическое соединение между центральным электродом и контактной головкой (см. рис. 1). Токопроводящий стеклогерметик одновременно играет роль уплотнения от прорыва газов, находящихся под высоким давлением. В свечу также может быть встроен резистор для подавления помех.

На конце присоединения изолятор покрыт не содержащей свинца водо- и грязеотталкивающей глазурью. Это предотвращает перекрытие изоляции. Соединение между изолятором и стальным корпусом с никелевым покрытием должно быть газонепроницаемым.

Рис. 1. Конструкция свечи зажигания:
1 – контактная головка с гайкой, 2 – изолятор; 3 – корпус, 4 – зона тепловой деформации, 5 – токопроводящий стеклогерметик, 6 – уплотнительная прокладка, 7 – резьба, 8 – центральный электрод (из Ni/Cu-сплава); 9 – изолятор центрального электрода; 10 – боковой заземляющий электрод (здесь электрод из Ni/Cu-сплава)



Боковой электрод(ы), соединенный с массой, также как центральный электрод обычно изготавливается из жаростойкого никелевого сплава и приваривается к корпусу свечи. Для улучшения рассеивания тепла, применяются составные центральные и боковые электроды с оболочкой из никелевого сплава и медным сердечником. Серебро, платина или платиновые сплавы используются в качестве материала электродов для специальных применений (например, в свечах с особо длительным сроком службы).

Свечи зажигания имеют на своей контактной головке резьбу M4 или стандартную резьбу SAE, в зависимости от типа высоковольтного соединения. Свечи зажигания с металлическими экранами используются для герметизированных и экранированных от радиопомех систем зажигания.

Диапазон рабочих температур

Во время работы двигателя свеча зажигания нагревается под действием теплоты сгорания топлива. Некоторая часть тепла, поглощенного свечой зажигания, передается к свежей топливно-воздушной смеси. Основная часть тепла передается на корпус свечи через центральный электрод и его изолятор и рассеивается в головке блока цилиндров. Рабочая температура отражает баланс тепла, поглощаемого свечой и рассеиваемого в головке блока цилиндров. Целью является обеспечение температуры самоочистки изолятора центрального электрода свечи, приблизительно равной 500 °C, даже при низкой нагрузке двигателя.

При снижении температуры ниже этого уровня возникает опасность отложения на холодных областях свечи нагара и масла вследствие неполного сгорания топлива (особенно, когда двигатель не достиг нормальной рабочей температуры при низких температурах наружного воздуха или во время пуска) (см. рис. 2, кривая 3). Это может привести к созданию проводимости (шунтирования) между центральным электродом и корпусом свечи зажигания. Это приведет к потерям энергии зажигания в форме тока короткого замыкания (что создает опасность пропусков зажигания). При более высоких температурах отложения нагара сгорают на изоляторе центрального электрода, свеча зажигания «очищает» сама себя (см. рис. 2, кривая 2).

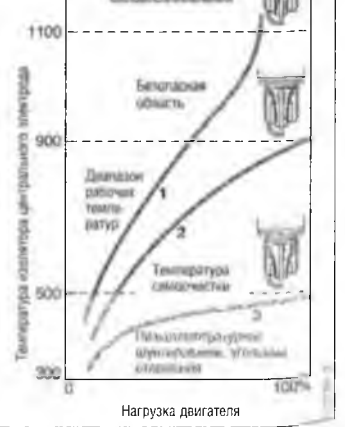
При этом температура не должна превышать 900 °C, поскольку в противном случае значительно увеличивается износ электродов свечи (вследствие окисления и коррозии под действием горячих газов). При дальнейшем повышении температуры возникает опасность самовоспламенения (зажигания топливно-воздушной смеси на горячих поверхностях) (см рис. 2, кривая 1). Самовоспламенение подвергает двигатель чрезвычайно высоким нагрузкам и может привести к его очень быстрому выходу из строя. Отсюда следует, что свеча зажигания должна соответствовать двигателю в отношении его теплопоглощающей способности.

Идентификатором тепловой нагрузочной способности свечи зажигания является ее тепловой коэффициент, обозначаемый калильным числом и определяемый посредством сравнительных измерений с использованием эталонного источника.

Для определения калильного числа свечей зажигания используется процедура фирмы Bosch, заключающаяся в измерении ион-

Рис. 2 Температурная характеристика свечи:
1 – свеча зажигания со слишком высоким калильным числом (горячая свеча), 2 – свеча зажигания с оптимальным калильным числом; 3 – свеча зажигания со слишком низким калильным числом (холодная свеча)

Диапазон рабочих температур свечей зажигания для двигателей с различными рабочими характеристиками должен составлять от 500 °C до 900 °C



ного тока в процессе сгорания топлива. Для оценки развития процесса сгорания топлива используется ионизирующий эффект пламени, процедура заключается в измерении проводимости в зазоре между электродами. Характеристические изменения в процессе сгорания топлива, вследствие увеличения тепловой нагрузки свечи зажигания, могут быть определены посредством измерения ионного тока и использованы для оценки процесса самовоспламенения. Свеча зажигания должна быть адаптирована таким образом, чтобы предотвратить преждевременное зажигание.

Применение материалов с высокой теплопроводностью (серебра или никелевых сплавов с медным сердечником) для изготовления центрального электрода позволяет значительно увеличить длину изолятора центрального электрода без изменения калильного числа свечи зажигания. Это расширяет рабочий диапазон в сторону низких тепловых нагрузок и снижает вероятность отложений нагара. Эти достоинства присущи всем свечам зажигания фирмы Bosch Super.

Уменьшение вероятности пропусков зажигания, сопровождающихся значительным повышением содержания углеводородов в отработавших газах, является чрезвычайно благоприятным фактором снижения токсичности отработавших газов и расхода топлива во время работы двигателя при частичном открытии дроссельной заслонки в режиме низкой нагрузки.

Зазор между электродами свечи зажигания и напряжение зажигания

Зазор между электродами свечи зажигания представляет собой кратчайшее расстояние между центральным и боковым (заземляющим) электродами, и среди других факторов определяет длину искры. Желательно иметь максимальные зазоры между электродами свечи, так как они позволяют искре зажигать относительно большие объемы топливно-воздушной смеси, что обеспечивает надежное сжигание этой смеси и хорошие мощностные характеристики двигателя. С другой стороны, чем меньше зазор, тем меньшее напряжение требуется для создания искры. При слишком малом зазоре вокруг электрода будет образовываться очень маленькое ядро пламени. При этом из ядра будет забираться энергия через поверхности контакта с электродами, и скорость распространения пламени будет низка. В крайних случаях потери энергии могут оказаться настолько велики, что будут происходить пропуски зажигания.

По мере увеличения зазора между электродами (например, вследствие их износа) условия зажигания улучшаются, но в то же время увеличивается требуемое напряжение. При этом, поскольку напряжение питания катушки зажигания остается неизменным, запас надежного зажигания по напряжению уменьшается, а риск пропусков зажигания увеличивается.

На величину требуемого напряжения зажигания оказывает влияние не только зазор между электродами, но также их форма, температура и материал. Важную роль также играют параметры, относящиеся к камере сгорания, такие как состав смеси (значение коэффициента избытка смеси (λ), скорость потока, степень турбулентности потока и плотность воспламеняемого газа.

На современных двигателях, характеризующихся высокими степенями сжатия и турбулентностью заряда, для обеспечения надежного зажигания и исключения пропусков воспламенения за весь период службы свечи следует особо соблюдать нормируемый зазор между электродами свечи.

Положение искры

Положение искры определяется расположением искрового промежутка относительно камеры сгорания. На современных двигателях (в особенности, оборудованных системами прямого впрыска топлива) положение искры оказывает значительное влияние на процесс сгорания топлива. Заметное улучшение динамики зажигания наблюдается при увеличении выступания свечи вглубь камеры сгорания. Процесс сгорания топлива может характеризоваться ровной или неровной работой двигателя, оцениваемой прямо по стабильности частоты вращения коленчатого вала или косвенно, посредством статического анализа среднего значения индуцированного давления.

В то же время, поскольку боковой заземляющий электрод свечи становится длиннее, достигаются более высокие температуры. Это, в свою очередь, влияет на износ и долговечность электродов. Требуемый ресурс свечи зажигания можно обеспечить посредством определенных конструктивных мер (удлинения корпуса свечи зажигания за пределы стенки камеры сгорания) или использования электродов из композитных или высокотемпературных материалов.

Конструкции свечей зажигания

В зависимости от предъявляемых к свече зажигания требований (долговечность, динамиче-

ские характеристики и т.д.), преимущества могут давать один или более боковых заземляющих электродов. Тип свечи зажигания определяется взаимным расположением электродов и положением боковых заземляющих электродов относительно изолятора центрального электрода.

Свеча с искровым промежутком

В соответствии с этой конструкцией (рис. 3, a) боковой заземляющий электрод располагается относительно центрального электрода таким образом, что искра проскакивает прямо между электродами, поджигая топливно-воздушную смесь между ними.

Свеча с поверхностным искровым промежутком

За счет определенного положения бокового электрода относительно керамической части изолятора центрального электрода искра, прежде чем перескочить через заполненный газом зазор, проходит по поверхности изолятора центрального электрода (см. рис. 3, b). Поскольку для разряда по поверхности требуется меньшее напряжение, чем для разряда через воздушный зазор такого же размера, при одном и том же напряжении поверхностная искра может перекрыть больший зазор между электродами. Образующееся в результате ядро пламени большего размера значительно улучшает условия зажигания.

Преимущество этой концепции заключается также в значительно лучшем поведении свечи в условиях частых пусков холодного двигателя, поскольку поверхностная искра очищает поверхность изолятора центрального электрода и предотвращает отложение на нем нагара.

Свеча зажигания с полуповерхностным искровым промежутком

В соответствии с этой концепцией боковые заземляющие электроды располагаются на определенном расстоянии от центрального электрода и торцевой поверхности керамического изолятора центрального электрода (см. рис. 3, c). В результате создаются два альтернативных зазора, т.е. используются обе формы разряда с различными требованиями к напряжению зажигания. В зависимости от условий работы, свеча может вести себя как свеча с пробоем воздушного зазора или с начальным перекрытием по поверхности.

Условное обозначение свечей зажигания Bosch

Условное обозначение свечи зажигания содержит ее рабочие характеристики (см. рис. 4). Зазор между электродами также указывается на упаковке. Свечи зажигания, подходящие для данного двигателя, указываются или рекомендуются производителем двигателя и фирмой Bosch. Детальная информация [1].

Рабочие характеристики свечей зажигания

Изменения в процессе эксплуатации

Поскольку свечи зажигания работают в агрессивной среде, иногда в условиях чрезвычайно высоких температур, электроды подвергаются износу, вызывающему увеличение требуемого для зажигания напряжения. Когда катушка зажигания перестает обеспечивать требуемое напряжение, возникают пропуски зажигания.

На работу свечи зажигания также оказывают влияние загрязнения и изменение состояния

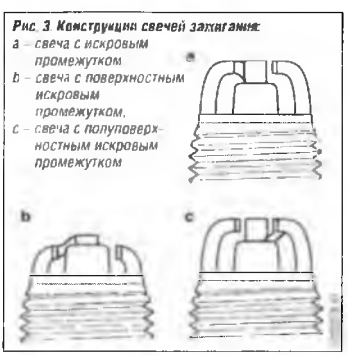


Рис. 3 Конструкция свечей зажигания:
a – свеча с искровым промежутком,
b – свеча с поверхностным искровым промежутком,
c – свеча с полуповерхностным искровым промежутком

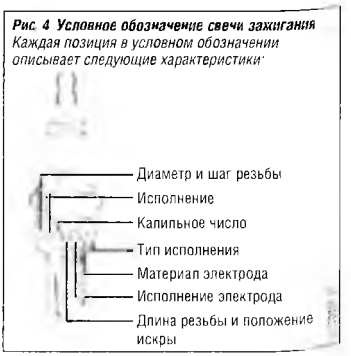


Рис. 4 Условное обозначение свечи зажигания
Каждая позиция в условном обозначении описывает следующие характеристики:

двигателя в процессе его старения (например, увеличение расхода масла). Отложения на свечах зажигания вызывают шунтирование искрового промежутка и, следовательно, нарушения в работе системы зажигания. Это, в свою очередь, может вызывать увеличение содержания токсичных выбросов в отработавших газах и даже повреждение каталитического нейтрализатора. В связи с этим свечи зажигания следует регулярно заменять.

Износ электродов

Износ электродов заключается в эрозии их материала. В результате, чем дольше эксплуатируется свеча, тем больше становится зазор между электродами. В основном ответственность за это несут два механизма: эрозия электродов и коррозия в камере сгорания.

Для сведения износа электродов к минимуму используются материалы с высокой термостойкостью (специальные стали, легированные платиной или иридием). Износ электродов можно также уменьшить за счет правильного выбора их геометрии и конструкции (свечи с полуповерхностным искровым промежутком). Для такой свечи с четырьмя боковыми электродами и восемью возможными искровыми промежутками (например, Bosch Super 4) вероятность распространения искры одинакова для всех электродов. Таким образом, износ равномерно распределяется между всеми четырьмя электродами.

Эрозию и износ электродов также позволяет снизить электрическое сопротивление стеклогерметика.

Свечи зажигания для двигателей с прямым впрыском топлива

Удачные концепции свечей зажигания могут быть разработаны для двигателей с прямым впрыском топлива, с направлением струи топлива на днище поршня или в поток завихрения воздуха (работа в режиме послойного распределения заряда смеси). В последних разработках все шире используются процессы, в которых топливо впрыскивается форсункой высокого давления во время такта всасывания что обеспечивает более ровную работу двигателя.

Для двигателей с турбонаддувом с использованием отработавших газов основное внимание при разработке свечей зажигания уделяется напряжению зажигания, рабочей температуре и сроку службы (уменьшение износа). В качестве примера можно привести свечи с платиновым центральным электродом и двумя боковыми заземляющими электродами с резьбой диаметром 12 мм, которые, в отличие от их использования в процессах сгорания смеси с направленным впрыском струи, не требуют специальной юстировки в моторном отсеке.

Ненормальные условия работы

Ненормальные условия работы (самовоспламенение смеси, детонация и т.д..) могут вызвать необратимые повреждения двигателя и свечей зажигания. Причинами таких повреждений могут стать неправильная настройка системы зажигания; использование свечей зажигания, калильное число которых не соответствует двигателю; или использование несоответствующего топлива.

Самовоспламенение смеси

Самовоспламенение смеси представляет собой неуправляемый процесс зажигания, в ходе которого в том или ином месте камеры сгорания (например в области изолятора центрального электрода свечи зажигания, выпускного клапана или прокладки головки блока цилиндров) могут возникать крайне высокие температуры, вызывающие серьезные повреждения двигателя и свечей зажигания.

Детонация

Детонация представляет собой процесс неконтролируемого сгорания смеси, сопровождающийся резким возрастанием давления. Процесс сгорания протекает значительно быстрее, чем при нормальных условиях. Вследствие высоких градиентов давления, компоненты двигателя (головка блока цилиндров, клапаны, поршни и свечи зажигания) испытывают чрезвычайно высокие тепловые нагрузки. Это может привести к повреждению одного или нескольких компонентов (см. «Предупреждение детонации»).

Литература

[1] www.bosch-zuendkerze.de

Каталитическая очистка отработавших газов

Каталитический нейтрализатор отработавших газов

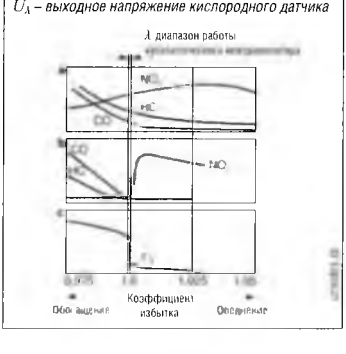
Законодательство в области ограничения токсичности отработавших газов устанавливает пределы содержания в них токсичных веществ. Для выполнения этих требований меры, связанные с совершенствованием конструкции двигателей, оказываются недостаточными. В дополнение к снижению количества неочищенных выбросов большое внимание уделяется каталитической очистке отработавших газов, с целью преобразования токсичных веществ. Каталитические нейтрализаторы преобразуют загрязняющие вещества, образующиеся в процессе сгорания топлива, в безвредные компоненты.

Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор отработавших газов

Функции

Современные технологии очистки отработавших газов для двигателей, работающих при стехиометрическом составе смеси, представляет трехкомпонентный каталитический нейтрализатор. Его задачей является преобразование токсичных веществ – HC (углеводородов), CO (оксида углерода) и NO_x (оксидов азота), образующихся в процессе сгорания топлива, в безвредные составляющие. Конечными продуктами являются H_2O (водяной пар), CO_2 (диоксид углерода) и N_2 (азот).

Рис. 1. Эффективность каталитического нейтрализатора в функции коэффициента избытка воздуха λ:
a – состав отработавших газов перед трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором,
b – состав отработавших газов после трехкомпонентного каталитического нейтрализатора;
c – электрический сигнал двухступенчатого кислородного датчика (λ-зонда),
U_λ – выходное напряжение кислородного датчика



Конструкция и принцип действия

Каталитический нейтрализатор состоит из контейнера из листовой стали, подложки, покрытия из пористого оксида и активного каталитического металлического покрытия. Подложка обычно представляет собой керамический монолит, хотя для специальных применений также используются металлические монолиты. На монолит наносится слой подложки, который увеличивает эффективную площадь каталитического нейтрализатора примерно в 7000 раз. Каталитический слой поверх подложки содержит благородные металлы, такие как платина или палладий и родий. Платина и палладий ускоряют окисление HC и CO, в то время как родий несет ответственность за восстановление NO.

Окисление CO и HC происходит в соответствии со следующими реакциями:

$$2\,CO + O_2 \longrightarrow 2\,CO_2\,,$$
$$2\,C_2H_6 + 7\,O_2 \longrightarrow 4\,CO_2 + 6\,H_2O\,.$$

Восстановление оксидов азота происходит в соответствии со следующей реакцией:

$$2\,NO + 2\,CO \longrightarrow N_2 + 2\,CO_2\,.$$

Кислород, требующийся для процесса окисления, либо присутствует в отработавших газах (в результате неполного сгорания топлива), либо забирается из оксидов азота NO_x, которые в то же время восстанавливаются.

Концентрация токсичных веществ в отработавших газах (перед каталитическим нейтрализатором) зависит от коэффициента избытка воздуха λ (см. рис. 1, a). Для как можно более полного преобразования трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором всех трех токсичных составляющих требуется стехиометрический состав топливно-воздушной смеси ($\lambda = 1$ см. рис. 1, b). При $\lambda = 1$ имеет место состояние равновесия между реакциями окисления и восстановления, что способствует полному окислению HC и CO с одновременным восстановлением NO. При этом HC и CO действуют в качестве восстановителей для NO. «Окно» (диапазон регулирования λ), в пределах которого должно находиться среднее значение λ, очень невелико. Отсюда следует, что смесеобразование должно

корректироваться с использованием замкнутой системы регулирования λ с применением в качестве устройства, вырабатывающего сигнал обратной связи, кислородного датчика λ (см. рис. 1,c) (см. «Регулирование λ»).

Каталитический нейтрализатор кислородного типа

Точность регулирования λ в динамическом диапазоне, как правило, составляет 5 %, т.е. отклонения от значения $\lambda = 1$ являются неизбежными. Каталитический нейтрализатор способен сам компенсировать небольшие колебания состава смеси. Он обладает способностью запасать избыточный кислород во время работы двигателя на бедной смеси и освобождать его при обогащении смеси. Слой подложки содержит цероксид, который может запасать и освобождать кислород в соответствии со следующей обратимой реакцией:

$$2\ Ce_2O_3 + O_2 \rightleftarrows 4\ CeO_2\ .$$

Следовательно, задача системы управления двигателем представляется вполне ясной. Усредненное по времени значение λ перед каталитическим нейтрализатором должно поддерживаться очень точно (допустимое отклонение составляет несколько тысячных долей). Отклонения, переведенные в количество запасаемого и освобождаемого кислорода, не должны превышать количества кислорода, которое может удерживать каталитический нейтрализатор. Типичные значения этого количества лежат в диапазоне от 100 мг до 1 г; в процессе старения каталитического нейтрализатора эти значения уменьшаются. Все обычные методы диагностики каталитического нейтрализатора основаны на прямом или косвенном определении его способности к накоплению кислорода.

При нормальной рабочей температуре каталитического нейтрализатора степень преобразования ограниченного количества токсичных веществ достигает 99%.

Каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа

Функция, конструкция и принцип действия

Во время работы двигателя на бедной смеси трехкомпонентный каталитический нейтрализатор не способен преобразовывать оксиды азота произведенные в процессе сгорания топлива. CO и HC окисляются остаточным кислородом, содержащимся в отработавших газах, и, следовательно, не могут служить в качестве восстановителей оксидов азота.

Каталитический слой каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа содержит вещества, способные накапливать NO_x (например, оксид бария). Все обычные покрытия, накапливающие NO_x, также обладают свойствами трехкомпонентного каталитического нейтрализатора, в результате чего каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа при $\lambda = 1$ работает таким же образом, как трехкомпонентный каталитический нейтрализатор.

При работе двигателя на бедной смеси в режиме послойного распределения заряда NO_x преобразуются в три этапа. Во время накопления NO_x сначала окисляются до диоксида азота NO_2, который затем реагирует со специальными оксидами на поверхности каталитического нейтрализатора и кислородом (O_2) с образованием нитратов (например, нитрата бария).

По мере того как количество накопленных NO_x (нагрузка) возрастает, способность нейтрализатора связывать NO_x понижается. При определенной нагрузке аккумулятор NO_x должен быть регенерирован, т.е. связанные в нем оксиды азота должны быть снова освобождены и преобразованы. С этой целью двигатель кратковременно переводится в режим работы на богатой однородной смеси ($\lambda < 0.8$) для восстановления NO до N_2 без выработки в ходе процесса CO и HC.

Время окончания фазы хранения и начала фазы освобождения либо вычисляется с использованием модели, либо определяется при помощи кислородного датчика λ после каталитического нейтрализатора.

Десульфатация

Содержащаяся в топливе сера также вступает в реакцию с аккумуляторным материалом в каталитическом слое. В результате с течением времени количество материала, имеющегося в наличии для накопления NO_x, уменьшается. Это приводит к образованию сульфатов (например, сульфата бария), которые обладают очень высокой тепловой стойкостью и не восстанавливаются во время регенерации NO_x. Для десульфатации каталитический нейтрализатор необходимо нагреть до 600–650 °C, а затем в течение нескольких минут двигатель должен попеременно работать на богатой ($\lambda = 0.95$) и бедной ($\lambda = 1.05$) смеси. В ходе этого процесса количество сульфатов уменьшается.

Используя различные методы нагрева каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа, расположенного под днищем автомобиля, следует соблюдать осторожность, чтобы не допустить перегрева первичного каталитического нейтрализатора.

Рабочая температура каталитического нейтрализатора

Каталитические нейтрализаторы не могут начать преобразование до тех пор, пока не достигнут определенной рабочей температуры (температуры запуска). Для трехкомпонентного каталитического нейтрализатора эта температура составляет приблизительно 300 °С. Идеальные условия для преобразования достигаются при температуре от 400 до 800 °С. Для каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа благоприятный диапазон температур ниже: он достигает максимальной накопительной способности при температуре от 300 до 400 °С.

Температуры от 800 °С до 1000 °С вызывают ускоренное тепловое старение каталитического нейтрализатора. Это старение вызывается спеканием благородных металлов и слоя подложки, в результате которого уменьшается активная поверхность катализатора. При температурах свыше 1000 °С тепловое старение происходит настолько быстро, что каталитический нейтрализатор вообще перестает оказывать какой-либо эффект.

Конфигурации каталитических нейтрализаторов

Требуемая рабочая температура трехкомпонентного каталитического нейтрализатора ограничивает варианты его установки. При установке каталитического нейтрализатора вблизи двигателя он быстро достигает рабочей температуры, но затем может испытывать очень высокие тепловые нагрузки.

Широко используется конфигурация трехкомпонентного каталитического нейтрализатора с разделенным на две части первичным нейтрализатором и главным каталитическим нейтрализатором, устанавливаемым под днищем автомобиля. Первичный каталитический нейтрализатор оптимизирован в отношении высокотемпературной стабильности, а главный нейтрализатор – в отношении низкой температуры активации. Различные возможные конфигурации первичного и главного (устанавливаемого под днищем) каталитических нейтрализаторов показаны на рис. 2. В связи с их более низкими максимально допустимыми рабочими температурами каталитические нейтрализаторы NO_x аккумуляторного типа всегда устанавливаются под днищем автомобиля.

Нагрев каталитического нейтрализатора отработавших газов

Количество выбросов HC и CO особенно велико, когда двигатель холодный, поскольку при этом топливо конденсируется на холодных стенках цилиндров, а затем выходит из камеры сгорания несгоревшим. Проблему усугубляет тот факт, что для эффективной работы каталитический нейтрализатор должен достичь минимальной рабочей температуры. Поэтому крайне важно снизить количество необработанных отработавших газов во время прогрева двигателя, пока каталитический нейтрализатор не достиг рабочей температуры. Отсюда следует необходимость принятия мер к быстрому нагреву каталитического нейтрализатора до рабочей температуры. Требуемое для этого тепло может быть обеспечено за

Рис. 2. Конфигурации установки каталитических нейтрализаторов:

a – установка первичного каталитического нейтрализатора и главного каталитического нейтрализатора,

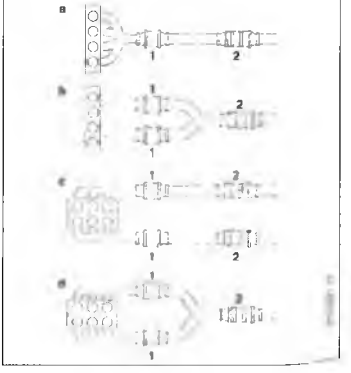
b – выпускной коллектор типа 4–2 для оптимизированных в отношении выходной мощности двигателей: установка каталитического нейтрализатора только после второго соединения неблагоприятна с точки зрения нагрева в связи с чем в некоторых случаях в моторном отсеке устанавливаются два первичных каталитических нейтрализатора;

c – двигатель более чем с одним блоком цилиндров (V-образный двигатель): система выпуска отработавших газов включает две ветви с первичным и главным каталитическим нейтрализатором в каждой из них;

d – двигатель более чем с одним блоком цилиндров (V-образный двигатель): тройниковое соединение под днищем автомобиля для создания единого канала выпуска отработавших газов с общим главным каталитическим нейтрализатором для обоих блоков цилиндров,

1 – первичный каталитический нейтрализатор,

2 – главный каталитический нейтрализатор



счет повышения температуры отработавших газов и увеличения их массового расхода. Это может быть сделано следующим образом.

Регулирование момента зажигания
Основным способом повышения температуры отработавших газов является сдвиг момента зажигания в сторону запаздывания. При этом сгорание смеси происходит во время такта расширения. К окончанию такта расширения отработавшие газы имеют относительно высокую температуру. Позднее сгорание топлива оказывает неблагоприятное влияние на к.п.д. двигателя.

Увеличение оборотов холостого хода
Дополнительной мерой является увеличение оборотов холостого хода и, соответственно, массового расхода отработавших газов. Повышение оборотов позволяет еще больше сдвинуть момент зажигания в сторону запаздывания. Тем не менее, в целях обеспечения устойчивой работы двигателя запаздывание зажигания ограничивается диапазоном от 10 до 15° после ВМТ. Дополнительного тепла, полученного вышеуказанными способами, не всегда оказывается достаточно для надлежащего снижения содержания токсичных веществ в отработавших газах.

Регулирование фаз газораспределения
При необходимости, можно использовать еще один способ увеличения теплового потока, заключающийся в регулировании фаз газораспределения. При как можно более раннем открытии выпускных клапанов происходит раннее прерывание процесса задержанного сгорания топлива, и количество произведенной механической работы уменьшается. Соответствующее количество энергии становится доступно в виде тепла для повышения температуры отработавших газов.

Разделение впрыска
Системы прямого впрыска бензина в принципе предоставляют возможность многократного впрыска топлива. Это позволяет быстро нагреть каталитический нейтрализатор до рабочей температуры без использования каких-либо дополнительных компонентов. Режим «разделения» заключается в первоначальном создании однородной бедной смеси посредством впрыска топлива во время такта впуска. Последующий впрыск топлива во время такта сжатия с переходом в режим послойного распределения заряда топлива позволяет сдвинуть момент зажигания в сторону запаздывания и повысить температуру отработавших газов. При этом достижимые тепловые потоки отработавших газов сравнимы с потоками, которые могут быть получены посредством нагнетания вторичного воздуха.

Система подачи дополнительных порций воздуха
Тепловое дожигания несгоревшего топлива повышает температуру в системе выпуска отработавших газов. С этой целью состав топливно-воздушной смеси регулируется в пределах от $\lambda = 0{,}9$ (богатая смесь) до $\lambda = 0{,}6$ (очень богатая смесь). Насос вторичного воздуха подает кислород в систему выпуска отработавших газов (см. рис. 3) в целях обеднения состава отработавших газов. Если базовая смесь очень богатая ($\lambda = 0{,}6$), несгоревшие составляющие топлива окисляются перед поступлением в каталитический нейтрализатор с выделением тепла (экзотермическая реакция) и подъемом температуры выше определенного порогового значения. Для достижения этой температуры необходимо: с одной стороны – сдвинуть момент зажигания в сторону запаздывания, а с другой стороны – подать вторичный воздух как можно ближе к выпускным клапанам. Экзотермическая реакция в системе выпуска отработавших газов увеличивает тепловой поток в направлении каталитического нейтрализатора и, следовательно, сокращает период его нагрева. HC и CO восстанавливаются в основном до поступления в каталитический нейтрализатор.

Если базовая смесь умеренно богатая ($\lambda = 0{,}9$), существенной реакции перед каталитическим нейтрализатором не происходит. Не-

Рис. 3. Система подачи вторичного воздуха:
1 – насос подачи вторичного воздуха; 2 – всасываемый воздух; 3 – реле; 4 – блок управления двигателем; 5 – клапан подачи вторичного воздуха; 6 – управляющий клапан; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – точка подвода воздуха в выхлопной трубе; 9 – выпускной клапан; 10 – к выпускному коллектору



сгоревшие составляющие топлива окисляются в каталитическом нейтрализаторе, что вызывает его нагрев изнутри. Однако для этого сначала необходимо довести температуру каталитического нейтрализатора до уровня «запуска» посредством обычных мер (например, сдвига момента зажигания в сторону запаздывания).

Как правило, используется умеренно богатая базовая смесь, поскольку в случае очень богатой смеси экзотермическая реакция перед каталитическим нейтрализатором может стабильно протекать только при стабильных граничных условиях.

Нагнетание вторичного воздуха осуществляется электрическим насосом, который включает реле при увеличении требуемой эффективной мощности двигателя. Поскольку клапан в системе вторичного воздуха предотвращает обратный поток отработавших газов в насос, когда насос выключен он должен быть закрыт. В качестве такого клапана может использоваться пассивный обратный клапан, электромагнитный клапан или (как показано на рис. 3) пневматический клапан с электромагнитным управляющим клапаном. При включении управляющего клапана – клапан подачи вторичного воздуха открывается под действием разрежения во впускном трубопроводе. Управление системой подачи вторичного воздуха осуществляется электронным блоком управления двигателем.

Альтернативные концепции активного нагрева
В некоторых случаях для быстрого нагрева каталитического нейтрализатора применяется электрообогрев. Нейтрализаторы с электрообогревом были ранее использованы в отдельных мелкосерийных проектах.

λ-регулирование

Для обеспечения как можно более высокой скорости преобразования HC, CO и NO$_x$ трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором компоненты реакции должны присутствовать в стехиометрическом соотношении. Для этого требуется поддержание значения $\lambda = 1{,}0$; т.е. стехиометрического соотношения воздух/топливо с очень высокой точностью.

Для этого управление процессом смесеобразования должно осуществляться при помощи замкнутой системы регулирования, поскольку требуемая точность не может быть достигнута только посредством управления дозированием топлива. При использовании замкнутой системы регулирования λ отклонения от заданного значения соотношения воздух/топливо могут быть обнаружены и скорректированы посредством изменения количества впрыскиваемого топлива. В качестве показателя состава топливно-воздушной смеси используется остаточное содержание кислорода в отработавших газах, измеряемое при помощи кислородных датчиков (см. двухступенчатые и широкополосные кислородные датчики).

Двухступенчатое регулирование λ

Система двухступенчатого регулирования λ служит для поддержания стехиометрического состава смеси с $\lambda = 1$. Преобразованная переменная величина, включающая скачки и участки линейного изменения напряжения, изменяет свое направление при каждом скачке выходного напряжения двухступенчатого кислородного датчика. Это означает переход от богатой смеси к бедной или наоборот (см. рис. 4). Типичная амплитуда колебаний этой преобразованной переменной должна быть в пределах 2–3 % от ее среднего значения. Результатом является ограничение динамики контроллера, которое в основном определяется суммой значений времени реакции (обусловленных предварительным накоплением топлива во впускном трубопроводе, четырехтактным принципом действия двигателя внутреннего сгорания и временем прохождения газов).

Асимметричная форма кривой преобразованной переменной позволяет скомпенсировать типичную недостоверность сигнала двухступенчатого датчика, вызванную колебаниями состава

Рис. 4. График изменения преобразованной переменной с регулируемым сдвигом в режиме разомкнутого регулирования (двухступенчатое регулирование):
a – переход к «богатой» смеси,
b – переход к «бедной» смеси,
t – время выдержки после скачка выходного напряжения датчика



топливно-воздушной смеси. При этом предпочтительным методом является задержка линейного возрастания преобразованной переменной в течение регулируемого времени выдержки t_V после скачка выходного напряжения датчика.

Непрерывное регулирование λ

Динамическая характеристика системы двухступенчатого регулирования может быть улучшена только в том случае, если может быть измерено фактическое отклонение от значения $\lambda = 1$. Для непрерывного регулирования с поддержанием $\lambda = 1$ с очень низкой амплитудой колебаний в сочетании с высокими динамическими характеристиками может быть использован широкополосный кислородный датчик. Параметры регулирования вычисляются и адаптируются в соответствии с рабочими режимами двигателя. Кроме того, при такой системе регулирования λ компенсация неизбежного смещения характеристики системы регулирования как в стационарном, так и нестационарном режиме осуществляется значительно быстрее.

Широкополосный кислородный датчик также позволяет регулировать состав смеси в случае его отклонения от $\lambda = 1$. Это позволяет осуществлять контролируемое обогащение смеси ($\lambda < 1$), например, для защиты компонентов, или контролируемое обеднение ($\lambda > 1$), например, во время прогрева каталитического нейтрализатора.

Система регулирования λ с использованием двух кислородных датчиков

Когда кислородный датчик находится перед каталитическим нейтрализатором, он испытывает высокие тепловые нагрузки и подвергается воздействию необработанных отработавших газов, что ограничивает точность измерения. Изменения состава отработавших газов могут вызывать сдвиг точки скачка выходного напряжения двухступенчатого кислородного датчика или характеристической кривой широкополосного кислородного датчика. Кислородный датчик, расположенный после каталитического нейтрализатора, подвергается этим воздействиям в значительно меньшей степени. Однако, система регулирования λ с использованием только кислородного датчика, расположенного после каталитического нейтрализатора, демонстрирует ухудшение динамической характеристики, обусловленное конечным временем прохождения газов, и замедленной реакцией на изменения состава смеси.

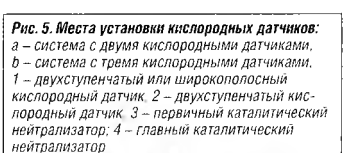
Более высокая точность может быть достигнута в системе, включающей два датчика. Здесь контур двухступенчатого или непрерывного регулирования λ дополняется более медленным корректирующим контуром, содержащим дополнительный двухступенчатый кислородный датчик (см. рис. 5, a). С этой целью выходное напряжения двухступенчатого кислородного датчика после каталитического нейтрализатора сравнивается со значением уставки (например, 600 мВ). В зависимости от величины отклонения, система регулирования соответствующим образом ступенчато изменяет уставку состава смеси в сторону обогащения или обеднения для первого контура регулирования, или значение уставки для контура непрерывного регулирования.

Система регулирования λ с использованием трех кислородных датчиков

Установка третьего кислородного датчика после главного каталитического нейтрализатора рекомендуется для облегчения диагностики каталитических нейтрализаторов и обеспечения повышенной стабильности состава отработавших газов для автомобилей категории SULEV (Автомобили со сверхнизким выбросом вредных веществ). Система регулирования с двумя кислородными датчиками (первый каскад) дополнена контуром регулирования с очень низким быстродействием с использованием третьего кислородного датчика, установленного после главного каталитического нейтрализатора (см. рис. 5, b).

Поскольку требования, предъявляемые к категории SULEV, относятся к величине пробега 150 000 миль, старение первичного каталитического нейтрализатора может привести к снижению точности измерения двухступенчатого кислородного датчика после первичного каталитического нейтрализатора. Этот эффект компенсируется посредством установки дополнительного двухступенчатого кислородного датчика после главного каталитического нейтрализатора

Рис. 5. Места установки кислородных датчиков: *a – система с двумя кислородными датчиками, b – система с тремя кислородными датчиками, 1 – двухступенчатый или широкополосный кислородный датчик, 2 – двухступенчатый кислородный датчик, 3 – первичный каталитический нейтрализатор; 4 – главный каталитический нейтрализатор*



Работа двигателя на сжиженном нефтяном газе

Применение

Сжиженный нефтяной газ (СНГ) получается во время извлечения сырой нефти и природного газа, а также в ходе различных процессов нефтепереработки. Основными его составляющими являются пропан и бутан (см. «Альтернативные виды топлива»).

В связи со значительным увеличением стоимости обычных видов топлива (бензина и дизельного топлива) в течение нескольких последних лет сжиженный нефтяной газ находит все более широкое применение в качестве автомобильного топлива. В настоящее время (на 2010 год) по оценкам в мире насчитывается более 13 миллионов автомобилей, работающих на СНГ. Информацию о количестве автомобилей, работающих на СНГ, и сети заправочных станций СНГ в Германии можно найти в Интернете (см. [1] и [2]). В зависимости от двигателя, системы управления и газовой системы расход топлива (по объему) для автомобилей, работающих на СНГ, на 20 – 30 % выше по сравнению с автомобилями, работающими на бензине. Несмотря на это, перевод автомобилей на СНГ окупается.

Системы СНГ различаются по способу смесеобразования (впрыск газообразного или жидкого СНГ), по концепции управления – с одним общим или двумя отдельными блоками управления двигателем (ведущий/ведомый). Системы со смесителями Вентури (карбюраторного типа) могут пока что использоваться на старых автомобилях или в странах с менее строгими требованиями к ограничению токсичности отработавших газов.

Практически все автомобили с двигателями с искровым зажиганием, которые могут работать на СНГ, являются двухтопливными, т.е. могут работать как на СНГ, так и на бензине. В основном, системы СНГ устанавливаются при модернизации автомобиля. В то же время все больше производителей автомобилей предлагают новые автомобили, способные работать как на бензине, так и на СНГ. На этих автомобилях, так же как на модернизированных автомобилях, бак с СНГ обычно устанавливается в углублении для запасного колеса. При этом полезный объем багажника остается неизменным. Запасное колесо просто убирается из автомобиля, а вместо него устанавливается комплект для ремонта шин.

Конструкция

Хранение СНГ

В зависимости от соотношения пропана и бутана, СНГ может находиться в жидком состоянии при температуре окружающего воздуха от –20 ° до +40 °С, под давлением от 3 до 15 бар. СНГ хранится в жидком состоянии в стальных баллонах. Система заправки СНГ включает ограничитель, не допускающий превышения объема заправки (жидкой фазы) свыше 80 % объема баллона. Это предотвращает увеличение давления в баллоне выше допустимого уровня при нагреве баллона. На баллоны для СНГ распространяются требования Европейских правил безопасности, определяющие их характеристики, дополнительное оборудование и правила установки – в настоящее время ECE-R67-01 [3]. Эти требования действуют также в некоторых неевропейских странах.

Предохранительные устройства баллона для СНГ включают клапан сброса давления, электромагнитный запорный клапан с встроенным ограничителем расхода (защита в случае разрыва трубопровода) и, в качестве дополнительного оборудования, тепловой предохранительный клапан, осуществляющий контролируемый выпуск газа в случае возгорания. Конструкция заправочной горловины не стандартизована. По этой причине в разных странах могут потребоваться различные заправочные переходники. В настоящее время разрабатываются стандартизованные нормы.

Подача топлива

В системах с нагнетанием газообразного топлива, получаемого из СНГ подача газа из баллона в двигатель осуществляется за счет внутреннего давления в баллоне (давления паров СНГ). Поскольку при понижении температуры наружного воздуха это давление также понижается, применение таких систем частично ограничено в отношении их пригодности для работы в зимних условиях.

В системах с впрыском жидкого топлива СНГ подается насосом, установленным в баллонне, который в дополнение к внутреннему давлению в баллоне создает давление подачи. В отношении их пригодности для работы в зимних условиях – такие системы сравнимы с системами впрыска бензина.

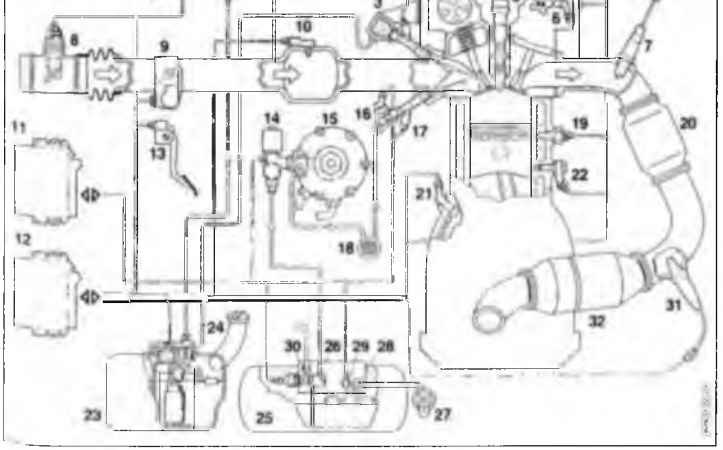
Компоненты

Системы СНГ включают следующие компоненты (см. рис. 1 и 2):

- заправочная горловина со встроенным обратным клапаном;
- стальной бак (цилиндрической или тороидальной формы);
- клапан сброса давления (27 бар);
- датчик и указатель уровня топлива;
- клапан с встроенным ограничителем объема заправки до 80 % объема баллона;
- электромагнитный запорный клапан (в баллоне);
- запорный клапан (в моторном отсеке);
- испаритель с регулятором давления (только в системах с подачей газообразного СНГ);
- регулятор давления (опция в системах с подачей жидкого СНГ);
- топливная рампа СНГ с газовыми форсунками;
- датчики температуры и давления (на топливной рампе);
- фильтр СНГ;
- при необходимости, дополнительный (подчиненный) электронный блок управления;
- регулируемый насос подачи СНГ (только в системах с подачей жидкого СНГ).

Рис. 1. Система с подачей газообразного СНГ:

1 – угольный фильтр; 2 – клапан продувки угольного фильтра; 3 – бензиновая топливная рампа с бензиновыми форсунками; 4 – регулятор фаз газораспределения, 5 – катушка зажигания со свечой зажигания, 6 – датчик положения распределительного вала, 7 – кислородный датчик перед каталитическим нейтрализатором, 8 – датчик массового расхода воздуха; 9 – дроссельная заслонка с электронной системой управления (ETC); 10 – датчик давления во впускном трубопроводе; 11 – блок управления системой СНГ, 12 – блок управления двигателем, 13 – модуль педали акселератора, 14 – запорный клапан СНГ; 15 – испаритель с регулятором давления; 16 – датчики давления и температуры; 17 – топливная рампа СНГ с газовыми форсунками; 18 – фильтр СНГ, 19 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 20 – первичный каталитический нейтрализатор; 21 – датчик частоты вращения коленчатого вала, 22 – датчик детонации; 23 – бензиновый топливный бак с встроенным электрическим топливным насосом, 24 – наливная горловина бензинового топливного бака, 25 – баллон для СНГ (стальной), 26 – электромагнитный запорный клапан; 27 – наливная горловина баллона СНГ, 28 – клапан ограничения объема заправки до 80% объема баллона, 29 – датчик уровня СНГ, 30 – клапан сброса давления; 31 – кислородный датчик после каталитического нейтрализатора; 32 – главный каталитический нейтрализатор



Системы управления двигателем при наличии системы СНГ

Так же как в системах сжатого природного газа, в системах СНГ управление может включать один или два (ведущий/ведомый) блока управления. Система управления двигателем учитывает давление и температуру газа. Она включает систему регулирования коэффициента избытка воздуха λ, адаптированную к работе двигателя на газе, и выполняет дополнительные функции, связанные с переключением питания с газа на бензин и обратно. В системах с подачей жидкого СНГ система управления, кроме подготовки смеси и адаптации к качеству топлива, осуществляет управление насосом подачи СНГ и регулирование температуры и давления в баллоне для СНГ.

Работа двигателей на сжиженном нефтяном газе

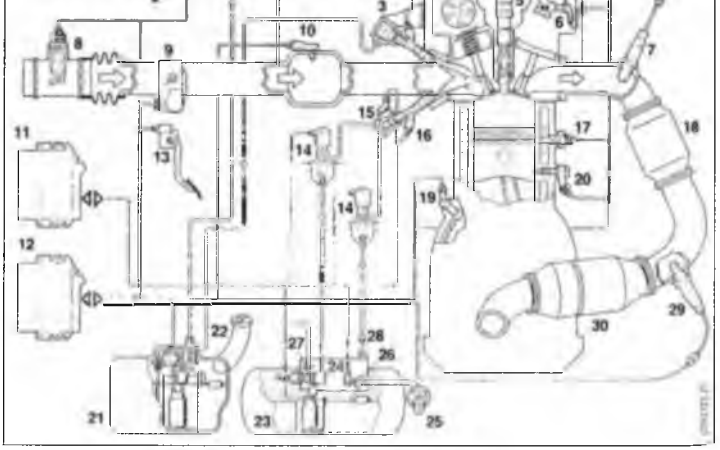
Системы с подачей газообразного топлива, получаемого из СНГ

Принцип действия:

СНГ подается из баллона в жидком состоянии через электромагнитный запорный клапан в моторной отсек, где установлен дополнительный запорный клапан (см. рис. 1). Затем СНГ

Рис. 2 Система с подачей жидкого СНГ:

1 – угольный фильтр, 2 – клапан продувки угольного фильтра: 3 – бензиновая топливная рампа с бензиновыми форсунками; 4 – регулятор фаз газораспределения; 5 – катушка зажигания со свечой зажигания, 6 – датчик положения распределительного вала; 7 – кислородный датчик перед каталитическим нейтрализатором, 8 – датчик массового расхода воздуха, 9 – дроссельная заслонка с электронной системой управления (ETC), 10 – датчик давления во впускном трубопроводе; 11 – блок управления системы СНГ, 12 – блок управления двигателем, 13 – модуль педали акселератора; 14 – запорный клапан СНГ для линий подачи и возврата топлива; 15 – датчики давления и температуры; 16 – топливная рампа СНГ с газовыми форсунками; 17 – датчик температуры двигателя; 18 – первичный каталитический нейтрализатор; 19 – датчик частоты вращения коленчатого вала: 20 – датчик детонации; 21 – бензиновый топливный бак с встроенным электрическим топливным насосом, 22 – наливная горловина бензинового топливного бака, 23 – баллон СНГ со встроенным электрическим топливным насосом, 24 – электромагнитный запорный клапан; 25 – наливная горловина баллона СНГ; 26 – клапан ограничения объема заправки до 80% объема баллона со встроенным датчиком уровня СНГ, 27 – клапан сброса давления; 28 – обратный клапан, 29 – кислородный датчик после каталитического нейтрализатора; 30 – главный каталитический нейтрализатор



переходит в газообразное состояние с давлением 2 – 3,5 бар в испарителе с регулятором давления. Для компенсации охлаждения во время фазы изменения состояния испаритель обогревается охлаждающей жидкостью двигателя. Из испарителя СНГ по трубопроводу высокого давления поступает в топливную рампу СНГ, а оттуда подается газовыми форсунками во впускной трубопровод.

Система воздухозабора двигателя остается без изменений, за исключением соединения газовых форсунок с впускным трубопроводом.

Смесеобразование

Смесеобразование осуществляется таким же образом, как в обычных многоточечных системах впрыска бензина. Топливная рампа СНГ снабжает отдельные газовые форсунки газообразным СНГ. Система управления двигателем определяет требуемое количество подаваемого топлива и корректирует его путем регулирования λ. Количество топлива дополнительно корректируется путем регулирования температуры и давления в топливной рампе СНГ.

Газообразный СНГ вытесняет некоторое количество воздуха из впускного трубопровода, что приводит к потерям заряда смеси на двигателях без наддува. В связи с этим при работе на газе можно ожидать снижения эффективной мощности двигателя на 2–4 %.

Системы с подачей жидкого СНГ

Принцип действия:

В системах с подачей жидкого СНГ (см. рис. 2) подача топлива осуществляется насосом, управляемым системой управления двигателем. Некоторые системы также включают регулятор давления. Системы с подачей жидкого СНГ должны быть оборудованы линией возврата топлива в бак. Кроме того, форсунки СНГ должны подавать топливо снизу, чтобы обеспечить удаление пузырьков паров газа, образующихся, например, при пуске горячего двигателя.

Смесеобразование

Также как в обычных системах многоточечного впрыска топлива, СНГ подается во впускной трубопровод перед впускными клапанами двигателя. Испарение сжиженного газа, происходящее во время подачи СНГ (эффект Джоуля-Томпсона) вызывает понижение температуры газовоздушной смеси, что оказывает благоприятное влияние на объемный к.п.д. двигателя и его рабочие характеристики. Поэтому в случае подачи жидкого СНГ эффективная мощность двигателя может быть даже несколько выше, чем при работе на бензине.

В настоящее время на стадии разработки находятся системы прямого впрыска жидкого СНГ в камеру сгорания (LPG-DI).

Выбросы отработавших газов

В отношении ограничения количества выбросов токсичных составляющих отработавших газов HC, CO и NO_x, использование в качестве топлива СНГ дает некоторые преимущества. Что касается выбросов CO_2, то здесь ситуация еще лучше. Здесь, при работе на СНГ снижение количества выбросов может достигать 10%, по сравнению с работой на бензине. В основном это обусловлено более низким содержанием углерода в СНГ. В отличие от дизельных двигателей, в выбросах практически отсутствуют твердые частицы. Работа двигателя на СНГ также дает преимущества в отношении вредных для здоровья человека составляющих отработавших газов, содержание которых не ограничивается законодательством. Например, при работе на СНГ имеет место значительно более низкое содержание в отработавших газах ароматических углеводородов (например, бензола).

В отличие от работы на СПГ (сжатом природном газе), работа двигателя на СНГ не требует каких-либо изменений в системе очистки отработавших газов. В основном при работе на СНГ используются те же компоненты, что и при работе на бензине.

Список литературы

[1] www.gastankstellen.de.

[2] www.autogastanken.de.

[3] ECE-R67: Standard conditions on the:

I. Approval of specific equipment of motor vehicles using LPG in their propulsion system.

II. Approval of a vehicle fitted with specific equipment for the use of LPG in its propulsion system with regard to the installation of such equipment.

Работа двигателя на сжатом природном газе

Применение

Ввиду повсеместных усилий, направленных на снижение выбросов CO_2, природный газ приобретает все большую важность в качестве альтернативного вида топлива для автомобилей. Сжатый природный газ (СПГ), который не следует путать со сжиженным нефтяным газом (СНГ), в основном состоит из метана. Сжиженный нефтяной газ в основном состоит из пропана и бутана (см. «Альтернативные виды топлива»).

По сравнению с бензином, при сгорании СПГ образуется приблизительно на 25% меньше CO_2. Таким образом, СПГ дает наименьшее количество выбросов CO_2 из всех видов ископаемого топлива. Применение в качестве топлива биогаза позволит в еще большей степени снизить глобальные выбросы парниковых газов. В связи с более низким содержанием CO_2 в отработавших газах, транспортный налог на автомобили, работающие на СПГ, во многих странах снижен

Тем временем различные производители начали предлагать варианты автомобилей, оборудованных для работы на сжатом природном газе. При этом баллоны для СПГ большего объема размещаются более удобно и эффективно, без потерь полезного объема багажного отделения, практически неизбежных при доделке автомобилей.

Последнюю информацию о количестве автомобилей, которые могут работать на СПГ, и сети заправочных станций СПГ в Германии можно найти в Интернете (см. [1] и [2]). Такие автомобили, как правило, являются двухтопливными, т.е. водитель может переключаться с бензина на газ и обратно. Существуют также варианты, получившие название «Monovalent plus», в которых двигатель оптимизирован для работы на природном газе с целью как можно более полного использования его преимуществ по сравнению с бензином (более высокая стойкость к детонации, меньшее количество выбросов CO_2 и токсичных веществ). На автомобилях варианта «Monovalent plus» , тем не менее, предусмотрен небольшой бензобак (< 15 л), чтобы можно было продолжать движение на бензине в случае отсутствия поблизости станции заправки природным газом.

Конструкция

Хранение природного газа

Природный газ может храниться в жидком состоянии при температуре –162°C (сжиженный природный газ) или в сжатом виде при давлении до 200 бар (сжатый природный газ, СПГ). Ввиду больших затрат, связанных с хранением природного газа в жидком состоянии, стандартным способом стало хранение в сжатом виде при давлении 200 бар Несмотря на столь высокое давление, плотность хранения энергии у природного газа значительно меньше, чем у бензина; для хранения количества природного газа с таким же энергосодержанием, как у бензина, требуется бак в четыре раза большего объема.

Компоненты

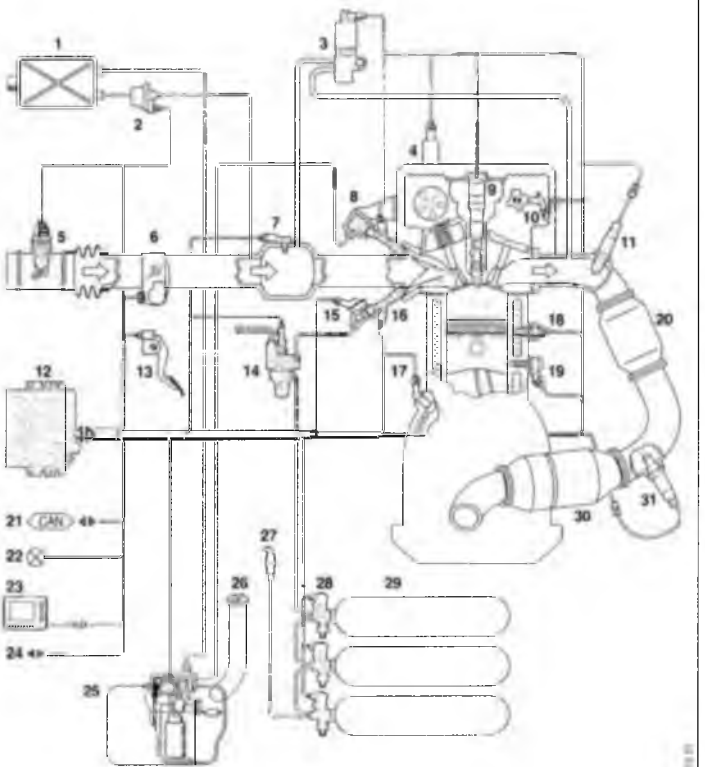
Автомобили, способные работать на природном газе, практически исключительно оборудованы двигателями с искровым зажиганием. Дополнительные компоненты включают следующее (см. рис. 1, [3]):

- заправочная горловина;
- баллон для природного газа;
- запорные клапаны высокого давления (на баллоне для природного газа);
- регулятор давления природного газа с датчиком высокого давления;
- газовая рампа с газовыми форсунками;
- комбинированный датчик давления и температуры.

Принцип действия

Всасываемый двигателем воздух проходит через датчик массового расхода воздуха и дроссельную заслонку с электронной системой управления и поступает во впускной трубопровод. Отсюда он подается в камеру сгорания через впускные клапаны (см. рис. 1). Природный газ, находящийся в баллоне под давлением 200 бар, проходит через запорный клапан высокого давления на баллоне и поступает в модуль регулирования давления который снижает давление до постоянного рабочего давления, составляющего приблизительно 7 бар (абсолютное давление). Затем по гибкому шлангу низкого давления газ поступает в газовую рампу, откуда он подается к газовым форсункам.

Рис. 1. Работа двигателя с искровым зажиганием на сжатом природном газе или бензине:
1 – угольный фильтр; 2 – клапан продувки угольного фильтра; 3 – клапан рециркуляции отработавших газов, 4 – регулятор фаз газораспределения; 5 – датчик массового расхода воздуха, 6 – дроссельная заслонка с электронной системой управления (ETC), 7 – датчик давления во впускном трубопроводе; 8 – бензиновая топливная рампа с бензиновыми форсунками; 9 – катушка зажигания со свечой зажигания; 10 – датчик положения распределительного вала; 11 – кислородный датчик перед каталитическим нейтрализатором; 12 – электронный блок управления Motronic, 13 – модуль педали акселератора, 14 – модуль регулирования давления природного газа с встроенным запорным клапаном и датчиком высокого давления; 15 – топливная рампа СПГ с датчиком давления и температуры природного газа; 16 – газовая форсунка, 17 – датчик частоты вращения коленчатого вала; 18 – датчик температуры охлаждающей жидкости, 19 – датчик детонации, 20 – первичный каталитический нейтрализатор; 21 – интерфейс CAN; 22 – сигнальная лампа, 23 – диагностический интерфейс; 24 – интерфейс иммобилайзера; 25 – бензиновый топливный бак с встроенным электрическим топливным насосом, 26 – наливная горловина бензинового топливного бака, 27 – заправочная горловина баллонов СПГ, 28 – запорный клапан высокого давления на баллоне СПГ; 29 – баллоны с природным газом; 30 – главный каталитический нейтрализатор, 31 – кислородный датчик после каталитического нейтрализатора



Системы управления двигателем для двухтопливных автомобилей

В настоящее время находят применение системы как с двумя блоками управления (по одному блоку управления для работы на бензине и газе), так и с одним общим блоком управления. На некоторых двухтопливных автомобилях водитель может выбирать работу на бензине или газе при помощи переключателя, однако на большинстве моделей это переключение осуществляется автоматически, т.е. двигатель работает на газе до тех пор, пока газ не заканчивается. В этом случае происходит автоматическое переключение на бензин.

Датчик высокой температуры, установленный на модуле регулирования давления, выдает в систему управления двигателем данные о текущем запасе газа в баллоне, а также используется при выполнении диагностики. Комбинированный датчик давления и температуры, установленный на газовой рампе, позволяет системе управления двигателем корректировать момент и продолжительность впрыска газа таким образом, чтобы состав смеси во впускном трубопроводе оставался стехиометрическим, несмотря на колебания плотности газа. Система управления двигателем также включает механизм адаптации к изменениям свойств газа.

Остальные датчики и исполнительные устройства системы управления двигателем в основном идентичны используемым в бензиновом двигателе.

Смесеобразование

В большинстве двигателей при работе на природном газе, так же как при работе на бензине, газ подается во впускной трубопровод. Из «общей топливной рампы низкого давления» газ подается к форсункам, которые в импульсном режиме осуществляют впрыск природного газа во впускной трубопровод. При этом улучшаются условия смесеобразования, поскольку подача полностью газообразного топлива исключает возможность его конденсации на стенках впускного трубопровода и отложения на них пленки топлива, как это может происходить при работе на бензине. Выброс токсичных компонентов с отработавшими газами при использовании СПГ снижается, особенно при работе двигателя в режиме прогрева.

В настоящее время на рынке предлагаются двухтопливные автомобили и варианты «Monovalent plus». Двухтопливные автомобили могут работать как на природном газе, так и на бензине, однако при работе на природном газе эффективная мощность двигателя снижается приблизительно на 10–15 %. Это связано с более низким значением мощности на единицу рабочего объема двигателя, что можно объяснить вытеснением всасываемого воздуха, нагнетаемым природным газом.

Двигатели автомобилей могут быть оптимизированы специально для работы на природном газе. Чрезвычайно высокая стойкость природного газа к детонации (октановое число по исследовательскому методу (RON) до 130) дает возможность увеличить степень сжатия и делает природный газ идеальным топливом для двигателей с наддувом. Одновременное уменьшение рабочего объема цилиндров повышает к.п.д. двигателя, благодаря дополнительному снижению сопротивления и потерь на трение.

Выбросы отработавших газов

При работе двигателя на природном газе количество выбросов CO_2 снижается, по сравнению с работой на бензине, приблизительно на 25%. Причина заключается в более благоприятном соотношении водород/углерод (отношение H/C) – почти 4:1 (для бензина приблизительно 2:1). Это приводит к образованию во время сгорания природного газа большего количества воды и меньшего количества CO_2.

Кроме практически полного отсутствия в выбросах твердых частиц, в сочетании с трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором, двигатель, работающий на природном газе, производит очень небольшие количества токсичных веществ (NO_x, CO и HC). Каталитический нейтрализатор для двигателя, работающего на природном газе, содержит большее количество благородного металла, что необходимо для улучшения преобразования углеводородов, состоящих в основном из химически стабильного метана, и компенсации более высокой температуры «поджига» для природного газа (минимальная температура каталитического нейтрализатора, при которой начинается преобразование токсичных веществ). Следует указать, что, в отличие от Европы, в США метан классифицируется как нетоксичное вещество и, следовательно, не рассматривается американским законодательством в области ограничения токсичности отработавших газов, как загрязняющее вещество.

Автомобили, работающие на природном газе, отвечают высоким требованиям в отношении предельного содержания токсичных веществ в отработавших газах, особенно это относится к автобусам, которые должны от-

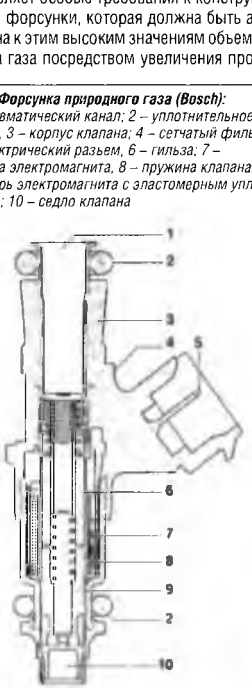
вечать более строгим требованиям EEV (усовершенствованный экологически чистый автомобиль, [4]). Использование природного газа также дает значительные преимущества по сравнению с бензиновыми и дизельными двигателями в отношении выбросов загрязняющих веществ, не регламентируемых законодательством. Некоторые из них являются канцерогенами, а также способствуют образованию смога и кислотных дождей.

Компоненты

Форсунка природного газа

Для обеспечения двигателя внутреннего сгорания газообразным топливом необходимо дозировать через газовые форсунки значительно большие объемы газа, чем объемы бензина в обычном бензиновом двигателе. Это условие предъявляет особые требования к конструкции газовой форсунки, которая должна быть адаптирована к этим высоким значениям объемного расхода газа посредством увеличения проходных сечений. Кроме того, высокие скорости потока газа требуют специальной формы каналов с целью снижения потерь давления в форсунке.

Рис. 2. Форсунка природного газа (Bosch):
1 – пневматический канал; 2 – уплотнительное кольцо, 3 – корпус клапана; 4 – сетчатый фильтр; 5 – электрический разъем, 6 – гильза; 7 – катушка электромагнита, 8 – пружина клапана; 9 – якорь электромагнита с эластомерным уплотнением; 10 – седло клапана



В двигателях с интенсивным наддувом давление во впускном трубопроводе может возрастать до 2,5 бар (абсолютное давление). Для снижения влияния давления во впускном трубопроводе на массовый расход необходимо, чтобы давление перед соплом в самом узком месте (точка дросселирования) было, как минимум, в два раза больше максимального давления во впускном трубопроводе (давление после сопла). При этом скорость газового потока равна скорости звука, независимо от абсолютного давления после сопла. Отсюда следует, что переменное давление во впускном трубопроводе не оказывает влияния на массовый расход. С учетом возможных потерь давления перед точкой дросселирования минимальное рабочее давление (абсолютное) должно составлять 7 бар.

Конструкция и принцип действия

Якорь электромагнита (см. рис. 2) находится в гильзе, служащей в качестве направляющей. Топливо протекает через канал внутри якоря. На выходном конце этого канала имеется эластомерное уплотнение. Это уплотнение прилегает к седлу клапана и изолирует подачу топлива от впускного трубопровода. При подаче питания катушка электромагнита создает магнитную силу, необходимую для подъема якоря электромагнита и открытия дозирующего сечения (точка дросселирования в седле клапана). Когда катушка обесточена, пружина клапана удерживает форсунку в закрытом положении.

Оптимизированная геометрия

Благодаря оптимизированному маршруту потока, потери давления перед точкой дросселирования сведены к минимуму, что обеспечивает максимально возможный массовый расход. Кроме того, самое узкое сечение и, следовательно, точка дросселирования находится на выходном конце, после уплотнения. Здесь скорость потока близка к скорости звука, поэтому в физическом смысле клапан представляет собой практически идеальное сопло.

Геометрия уплотнений

Газовая форсунка установлена с эластомерным уплотнением и в отношении геометрии уплотнения седла подобна запорным клапанам для пневматических систем. Эластомерный материал улучшает герметичность уплотнения металлических игольчатых клапанов.

Эластомерный материал также обладает демпфирующими свойствами и предотвращает «дребезг», т.е. повторные нежелательные колебания якоря электромагнита во время закрытия, что повышает точность дозирования.

Модуль регулирования давления

Функции

Функция модуля регулирования давления заключается в снижении давления природного газа в баллоне до номинального рабочего давления. В то же время рабочее давление необходимо с определенным допуском поддерживать постоянным при любых условиях работы. Величина рабочего давления в современных системах составляет 7–9 бар (абсолютное). Существуют также системы, в которых рабочее давление составляет от 2 до 11 бар.

Конструкция

В настоящее время в основном используются регуляторы давления диафрагменного или плунжерного типа. Снижение давления осуществляется за счет дросселирования. Регуляторы давления могут быть одноступенчатыми или многоступенчатыми.

На рис. 3 показан разрез одноступенчатого регулятора давления диафрагменного типа. Модуль регулирования давления содержит спеченный фильтр (40 мкм), запорный клапан и датчик высокого давления, установленные на стороне высокого давления. Спеченный фильтр служит для фильтрации твердых частиц, содержащихся в потоке газа.

Рис. 3. Модуль регулирования давления:
1 – катушка электромагнитного запорного клапана; 2 – уплотнение, 3 – впуск газа под высоким давлением со спеченным фильтром, 4 – датчик высокого давления, 5 – выпуск низкого давления; 6 – предохранительный клапан сброса давления, 7 – камера низкого давления, 8 – диафрагма с креплением, 9 – регулирующий стержень, 10 – регулировочный винт, 11 – пружина, 12 – регулирующий плунжер и дроссельная диафрагма



Запорный клапан позволяет перекрывать поток газа, например, когда двигатель остановлен. Датчик высокого давления служит для определения наличия газа в баллоне а также используется при выполнении диагностики.

На стороне низкого давления установлен клапан сброса давления. В случае неисправности регулятора давления этот клапан предотвращает повреждение компонентов системы низкого давления.

При нормальных условиях газ во время расширения очень сильно охлаждается (эффект Джоуля-Томпсона). Для предотвращения замерзания газа модуль регулирования давления имеет встроенный обогреватель, подключенный к системе отопления автомобиля.

Величина рабочего давления зависит от размера диафрагмы и начального натяжения пружины, которое устанавливается при помощи регулировочного винта на заводе-изготовителе.

Принцип действия

Поток газа со стороны высокого давления через регулируемую дроссельную диафрагму поступает в камеру низкого давления, в которой находится мембрана. Мембрана через регулирующий стержень регулирует степень открытия дроссельной диафрагмы. Когда давление в камере низкого давления понижается, мембрана прижимается пружиной к дроссельной диафрагме, которая открывается, позволяя возрастать давлению на стороне низкого давления. При повышении давления в камере низкого давления пружина дополнительно сжимается, и дроссельная диафрагма закрывается. Уменьшение проходного сечения дроссельной диафрагмы вызывает снижение давления на стороне низкого давления. В установившемся режиме образуется проходное сечение дроссельной диафрагмы, требуемое для создания рабочего давления, и давление в камере низкого давления остается практически постоянным.

Минимальные колебания рабочего давления при изменениях нагрузки свидетельствуют об исправности регулятора давления.

Список литературы
[1] www.erdgasfahrzeuge.de.
[2] www.gibgas.de.
[3] T. Allgeier, J. Forster: 2nd International CTI Forum, Stuttgart, March 2007; Einspritzsysteme – Motormanagementsystem und Komponenten fur Erdgasfahrzeuge
[4] www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de.

Управление работой дизельного двигателя

Описание системы управления двигателем

В дизельном двигателе топливо всегда впрыскивается непосредственно в камеру сгорания под давлением от 200 до 2200 бар. В зависимости от конструкции, в двигателях с непрямым впрыском топливо впрыскивается в форкамеру под относительно низким давлением (менее 350 бар). В системах прямого впрыска топлива, получивших наибольшее распространение, топливо впрыскивается в неразделенную камеру сгорания под высоким давлением (до более чем 2200 бар).

Управление работой дизельного двигателя

Конструктивные требования

Вырабатываемая дизельным двигателем мощность P определяется крутящим моментом на коленчатом вале, передаваемым сцеплению, и частотой вращения коленчатого вала. Крутящий момент на коленчатом вале равняется крутящему моменту, создаваемому в процессе сгорания топлива, за вычетом механических потерь на трение, газообмен и привод вспомогательных агрегатов. Крутящий момент создается в процессе силового цикла, и при наличии достаточного количества воздуха определятся следующими переменными: массой подаваемого топлива, моментом начала сгорания топлива, определяемым началом впрыска, и процессами впрыска и сгорания топлива.

Кроме того, максимальный, зависящий от частоты вращения коленчатого вала крутящий момент ограничен требованиями к ограничению дымности выхлопа, давлением в цилиндрах, тепловой нагрузкой различных компонентов и величиной механической нагрузки всей кинематической цепи привода.

Основная функция системы управления двигателем

Основной функцией системы управления двигателем является регулирование создаваемого двигателем крутящего момента или, при некоторых условиях, регулирование частоты вращения коленчатого вала в пределах допустимого диапазона (например, оборотов холостого хода).

В дизельном двигателе очистка отработавших газов и подавление шума осуществляются в значительной степени внутри самого двигателя, т.е. путем управления процессом сгорания топлива. Это, в свою очередь, осуществляется системой управления двигателем посредством управления следующими переменными:

- заряд смеси в цилиндре;
- объем заряда смеси, подаваемого во время такта впуска;
- состав заряда смеси (рециркуляция отработавших газов);
- движение заряда (завихрения на впуске);
- момент начала впрыска;
- давление впрыска;
- распределение впрыска топлива (например, предварительный впрыск, разделенный впрыск топлива и т.д.).

До начала 1980-х годов управление впрыском топлива и зажиганием осуществлялось исключительно при помощи механических устройств. Например, в топливном насосе высокого давления количество подаваемого топлива регулируется в зависимости от нагрузки двигателя и частоты вращения коленчатого вала путем поворота плунжера насоса, имеющего спиральную канавку. В случае механического регулирования начало впрыска/подачи топлива регулируется при помощи центробежного регулятора (зависимого от скорости вращения). Также применялись гидравлические системы регулирования, в которых количество топлива менялось посредством регулирования давления в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.

В настоящее время, в связи со строгими требованиями законодательства в отношении ограничения токсичности выбросов, требуется очень точное регулирование количества впрыскиваемого топлива и момента начала впрыска в зависимости от таких переменных, как температура, частота вращения коленчатого вала, нагрузка и высота над уровнем моря. Это может быть обеспечено только при помощи электронных систем управления. Сегодня электронные системы управления полностью вытеснили механические. Это единственный метод управления, позволяющий осуществлять непрерывный мониторинг функций системы впрыска топлива, влияющих на содержание вредных веществ в выбросах автомобиля. В некоторых случаях законодательство требует также наличия системы бортовой диагностики.

Регулирование количества впрыскиваемого топлива и момента начала впрыска осуществляется системами EDC (электронная система управления дизельным двигателем) при помощи элек-

тромагнитных клапанов высокого или низкого давления или иных исполнительных устройств. Регулирование подачи топлива, т.е. количества топлива на один градус поворота коленчатого вала, может осуществляться косвенным образом, например, при помощи сервоклапана и регулирования величины подъема игольчатого клапана.

Электронная система управления дизельным двигателем

Электронная система управления дизельным двигателем позволяет осуществлять точную и дифференцированную модуляцию параметров процесса впрыска топлива. Это единственный способ удовлетворить самые разные требования, предъявляемые к современному дизельному двигателю.

Обзор системы

Конструктивные требования

Снижение расхода топлива и содержания вредных веществ (NO_x, CO, HC, твердых частиц) в отработавших газах с одновременным повышением эффективной мощности двигателя являются главными задачами, стоящими перед разработчиками дизельных двигателей. За последние годы это привело ко все большему распространению систем прямого впрыска топлива (DI), в которых давление впрыска значительно больше, чем в системах непрямого впрыска (IDI) с вихрекамерами или форкамерами. Кроме того, большое влияние оказывают возросшие требования к уровню комфорта современных автомобилей. Все более строгие требования предъявляются к уровню шума. В результате также значительно возросли требования, предъявляемые к системам управления двигателем и впрыска топлива, в частности в отношении:

- высоких давлений впрыска;
- формирования параметров;
- предварительного и, при необходимости, последующего впрыска топлива;
- регулирования количества впрыскиваемого топлива, давления наддувочного воздуха и момента начала впрыска, в зависимости от условий работы двигателя;
- подачи дополнительного, зависимого от температуры, количества топлива при пуске двигателя;
- независимого от нагрузки регулирования частоты вращения коленчатого вала при работе двигателя на холостом ходу;
- регулируемой рециркуляции отработавших газов;
- системы круиз-контроля;
- высокой точности регулирования момента начала впрыска топлива и количества впрыскиваемого топлива на протяжении всего срока службы двигателя.

В обычных механических системах регулирования частоты вращения коленчатого вала используется ряд регулирующих устройств, назначением которых является адаптация к различным условиям работы двигателя. Тем не менее, такие системы ограничиваются простым контуром регулирования, и существует ряд важных переменных величин, которых они не могут учитывать или не могут достаточно быстро реагировать на их изменения. В связи с возросшими требованиями, относительно простые системы управления с использованием электрических исполнительных устройств развились в сложные электронные системы управления двигателем, способные обрабатывать большие объемы данных в режиме реального времени. Они могут составлять часть общей электронной системы управления автомобилем. Благодаря возросшей степени интеграции электронных компонентов, блоки управления чрезвычайно компактны.

Принципы действия

Электронная система управления дизельным двигателем (EDC) способна обеспечивать выполнение всех вышеуказанных требований, благодаря применению микропроцессоров.

В отличие от автомобилей с дизельными двигателями с обычным рядным или распределительным топливным насосом высокого давления, водитель автомобиля с EDC не оказывает прямого влияния на количество впрыскиваемого топлива при помощи педали акселератора и троса управления дроссельной заслонкой. Вместо этого количество впрыскиваемого топлива определяется рядом переменных величин. Это, например, команды водителя (положение педали подачи топлива), условия работы двигателя, температура двигателя, вмешательства других систем (например, системы управления тяговым усилием) и состав отработавших газов.

Момент начала впрыска также может регулироваться. Все это требует наличия всеобъемлющей концепции системы мониторинга, определяющей несоответствия и инициирующей соответствующие действия (например, ограничение крутящего момента или переход на аварийный режим в диапазоне оборотов холостого хода). Отсюда следует, что электронная система управления дизельным двигателем должна содержать большое количество контуров регулирования.

Электронная система управления дизельным двигателем может осуществлять обмен данными с другими электронными системами, такими как система регулирования тягового усилия (TCS), электронная система управления трансмиссией (ETC) или система курсовой устойчивости (ESP). Отсюда следует, что система управления двигателем может быть встроена в общую систему управления автомобилем, приобретая новые функции, такие как снижение крутящего момента двигателя во время переключения передач автоматической трансмиссией или регулирование крутящего момента для компенсации пробуксовки колес.

Система EDC полностью интегрирована в систему диагностики автомобиля. Она отвечает всем требованиям OBD (система бортовой диагностики) и EOBD (европейские нормы OBD).

Блоки системы

Электронная система управления дизельным двигателем (EDC) разделена на три блока (см. рис. 1).

Датчики и генераторы управляющих сигналов определяют условия работы двигателя (например частоту вращения коленчатого вала) и значения управляющих сигналов (например, положение выключателей). Они преобразуют физические переменные в электрические сигналы.

Блок управления двигателем обрабатывает сигналы датчиков и генераторов управляющих сигналов в соответствии с заложенными в нем алгоритмами вычислений (алгоритмами управления с обратной связью и без обратной связи). Посредством электрических выходных сигналов он осуществляет управление исполнительными механизмами. Кроме того, блок управления двигателем действует в качестве интерфейса с другими системами и с системой диагностики автомобиля.

Исполнительные механизмы (такие как электромагнитный клапан системы впрыска топлива) преобразуют электрические сигналы в механические параметры.

Обработка данных

Основная функция электронной системы управления дизельным двигателем (EDC) – регулирование количества впрыскиваемого топлива, момента начала впрыска и продолжительности впрыска. Система впрыска топлива с общей топливной магистралью также регулирует давление топлива. Кроме того, блок управления двигателем осуществляет управление большим количеством других исполнительных механизмов.

Для эффективной работы всех компонентов функции системы EDC должны быть точно согласованы с каждым автомобилем и каждым двигателем. Это единственный способ оптимизировать взаимодействие компонентов (см. рис. 2). Блок управления двигателем обрабатывает сигналы датчиков и ограничивает их до допустимого уровня напряжения. Некоторые входные сигналы также проверяются на предмет достоверности. Используя эти входные данные и хранящиеся в памяти программы, микропроцессор вычисляет момент и продолжительность впрыска топлива. Затем эта информация преобразу-

Рис. 1. Компоненты электронной системы управления дизельным двигателем (EDC)

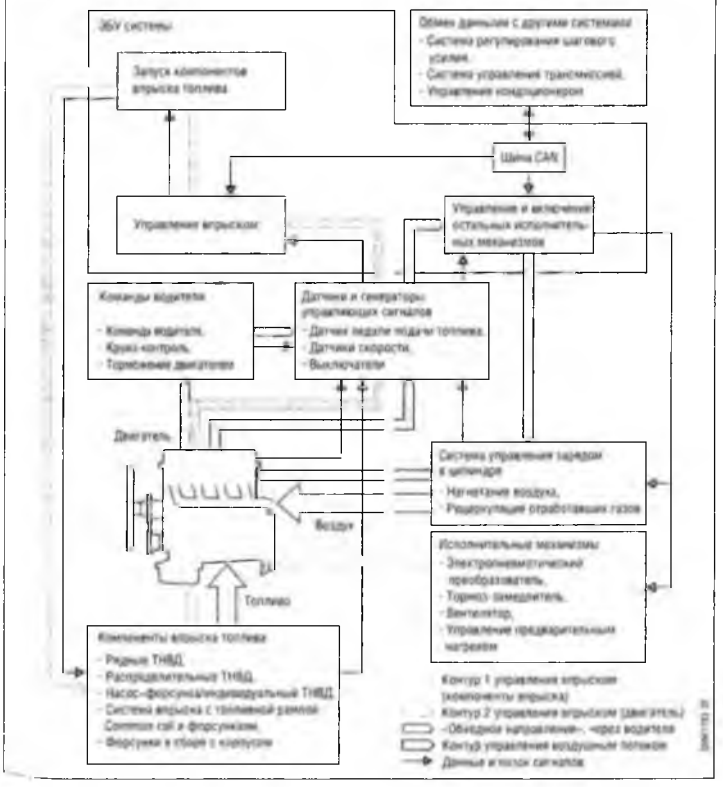


ется в сигналы, согласованные с положениями поршней цилиндров двигателя. Эта программа вычислений имеет название «программное обеспечение блока управления».

Необходимая большая точность вместе с высокими динамическими качествами двигателя требуют высокой вычислительной мощности. Выходные сигналы подаются на выходные каскады, обеспечивающие достаточную электрическую мощность для приведения в действие исполнительных механизмов (например, клапанов высокого давления системы впрыска топлива, клапана системы рециркуляции отработавших газов или регулятора давления наддува). Кроме того, система осуществляет управление рядом вспомогательных компонентов (например, реле свечей накаливания и системой кондиционирования воздуха).

Отклонения характеристик сигналов определяются системой диагностики электромагнитных клапанов. Кроме того, блок управления осуществляет обмен сигналами и другими системами автомобиля через соответствующие интерфейсы. Блок управления двигателем производит мониторинг всей системы впрыска топлива, являющийся частью общей стратегии обеспечения безопасности.

Рис. 2. Основные последовательности функционирования элементов электронной системы управления дизельным двигателем



Система подачи топлива (ступень низкого давления)

Функция системы подачи топлива заключается в фильтрации, накоплении и подаче топлива в систему впрыска под давлением, соответствующим любым рабочим условиям. В некоторых случаях осуществляется охлаждение топлива, возвращаемого в топливный бак. Система подачи топлива включает следующие основные компоненты (см. рис. 1–3): топливный бак, фильтр грубой очистки (не для системы насос-форсунок легковых автомобилей), предварительный насос (опция, на легковых автомобилях может устанавливаться в топливном баке), топливный фильтр, насос подачи топлива (низкого давления), клапан регулирования давления (перепускной клапан), охладитель топлива (опция) и топливопроводы низкого давления.

Отдельные компоненты могут быть объединены в функциональные узлы (например, насос подачи топлива с ограничителем давления). В осевых и радиально-поршневых распределительных насосах и, частично, в системе общей топливной магистрали, насос подачи топлива встроен в насос высокого давления.

Системы подачи топлива значительно различаются в зависимости от используемой системы впрыска топлива, см. рис. 1, 2 и 3 (системы с общей топливной магистралью, с насос-форсунками и с радиально-поршневым ТНВД, соответственно).

Подача топлива

Назначением насоса подачи топлива в ступени низкого давления (предварительного насоса) является снабжение компонентов высокого давления достаточным количеством топлива при любых условиях работы, с низким уровнем шума, под требуемым давлением и на протяжении всего срока службы автомобиля. В зависимости от области применения, используются насосы различных типов.

Электрические топливные насосы

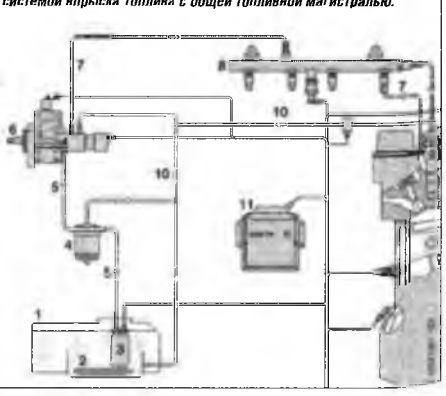
Электрические топливные насосы (см. рис. 4) различных типов применяются для двигателей с искровым зажиганием. Для дизельных двигателей обычно применяются роторные роликовые насосы.

Примеры использования:

- в качестве дополнительного насоса для распределительного топливного насоса (только в случае длинных топливопроводов или большой разницы по высоте между топливным баком и топливным насосом);
- в системах впрыска топлива с насос-форсунками (для легковых автомобилей);
- в системах впрыска топлива с общей топливной магистралью (для легковых автомобилей).

Рис. 1 Топливная система автомобиля с системой впрыска топлива с общей топливной магистралью:

1 – топливный бак;
2 – фильтр грубой очистки;
3 – насос подачи топлива;
4 – топливный фильтр;
5 – топливопроводы низкого давления,
6 – насос высокого давления;
7 – топливопроводы высокого давления,
8 – общая топливная магистраль;
9 – форсунка,
10 – линия возврата топлива,
11 – блок управления



Шестеренчатый насос

Шестеренчатый насос устанавливается прямо на двигателе или, в случае общей топливной магистрали, встраивается в топливный насос высокого давления. Он приводится во вращение механически, посредством муфты, зубчатой передачи или зубчатого ремня.

Основными компонентами насоса являются два входящих в зацепление друг с другом зубчатых колеса, вращающихся в противоположных направлениях (см. рис. 5), которые подают топливо во впадины между зубьями со стороны всасывания в сторону нагнетания. Линия контакта зубчатых колес обеспечивает уплотнение между сторонами всасывания и нагнетания, что предотвращает обратный поток топлива.

Производительность насоса приблизительно пропорциональна частоте вращения коленчатого вала. Поэтому подача топлива регулируется при помощи ограничителей на стороне всасывания или перепускного клапана на стороне нагнетания.

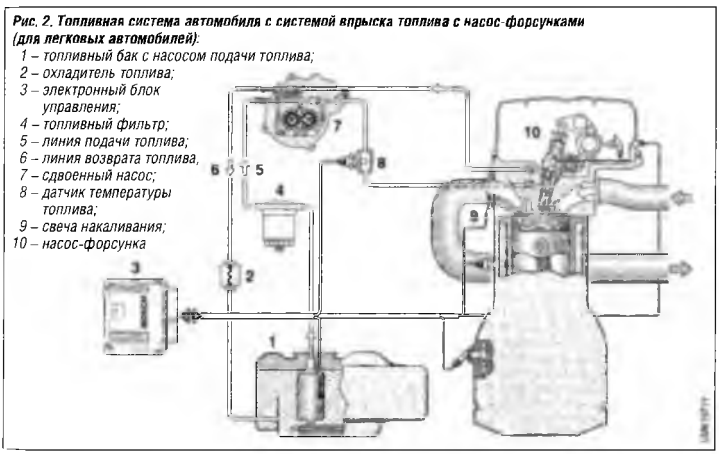


Рис. 2. Топливная система автомобиля с системой впрыска топлива с насос-форсунками (для легковых автомобилей):
1 – топливный бак с насосом подачи топлива;
2 – охладитель топлива;
3 – электронный блок управления;
4 – топливный фильтр;
5 – линия подачи топлива;
6 – линия возврата топлива,
7 – сдвоенный насос;
8 – датчик температуры топлива;
9 – свеча накаливания;
10 – насос-форсунка

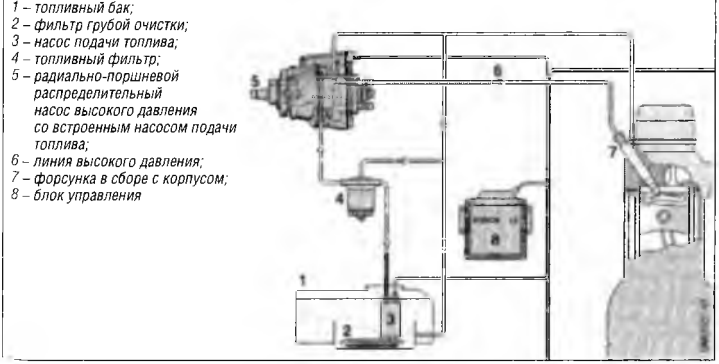


Рис. 3. Топливная система автомобиля с системой впрыска топлива с радиально-поршневым топливным насосом высокого давления:
1 – топливный бак;
2 – фильтр грубой очистки;
3 – насос подачи топлива;
4 – топливный фильтр;
5 – радиально-поршневой распределительный насос высокого давления со встроенным насосом подачи топлива;
6 – линия высокого давления;
7 – форсунка в сборе с корпусом;
8 – блок управления

Примеры использования:
- в системах с одноцилиндровыми насосами высокого давления на коммерческих автомобилях (системы с насос-форсунками или отдельным топливным насосом высокого давления);
- частично, в системах с общей топливной магистралью (для коммерческих, легковых и внедорожных автомобилей).

Рис. 4. Одноступенчатый электрический топливный насос:
a – насосный элемент,
b – электродвигатель;
c – соединительная крышка;
1 – сторона нагнетания;
2 – якорь электродвигателя;
3 – насосный элемент;
4 – ограничитель давления,
5 – сторона всасывания;
6 – обратный клапан

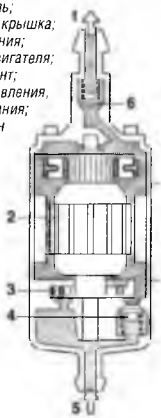
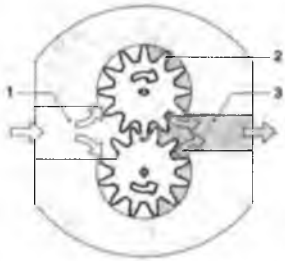


Рис. 5. Шестеренчатый топливный насос (схематическое изображение):
1 – сторона всасывания; 2 – зубчатая шестерня, 3 – сторона нагнетания



Лопастной насос подачи топлива

Лопастной насос подачи топлива (см. рис. 6) устанавливается на приводном вале в распределительном топливном насосе высокого давления. На приводном вале на сегментной шпонке установлено рабочее колесо. Эксцентриковое кольцо, установленное в корпусе, окружает рабочее колесо.

Под действием центробежных сил, создаваемых во время вращения, четыре лопасти рабочего колеса прижимаются к эксцентриковому кольцу. Топливо, находящееся между обратной стороной лопастей и рабочим колесом, способствует выдвижению лопастей наружу.

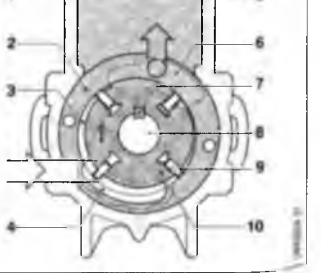
Топливо проходит через впускной канал и серпообразную полость в пространство, образуемое рабочим колесом, лопастью и эксцентриковым кольцом. Силы вращательного движения вытесняют топливо, находящееся между лопастями, в верхнюю серпообразную полость и далее в выпускной канал.

Пример использования: в качестве насоса предварительной подачи топлива, встраиваемого в распределительный насос высокого давления.

Роторный насос с запорными лопастями

В роторном насосе с запорными лопастями (см. рис. 7), две лопасти прижимаются пру-

Рис. 6. Лопастной насос:
1 – внутренняя камера насоса; 2 – эксцентриковое кольцо, 3 – серпообразная полость, 4 – впуск топлива (всасывающая камера); 5 – корпус насоса, 6 – выпуск топлива (нагнетательная камера); 7 – сегментная шпонка; 8 – приводной вал; 9 – лопасть; 10 – рабочее колесо



жинами к ротору. По мере поворота ротора объем на стороне всасывания увеличивается, и топливо засасывается в две камеры. На стороне нагнетания объем уменьшается, и топливо вытесняется из камер.

Роторный насос с запорными лопастями осуществляет подачу топлива с очень низкой скоростью.

Пример использования: на легковых автомобилях, совместно с системами впрыска топлива с использованием насос-форсунок.

Сдвоенный топливный насос

Сдвоенный топливный насос (см. рис. 8) представляет собой узел, состоящий из насоса подачи топлива и вакуумного насоса для усилителя тормозов. Он встраивается в головку блока цилиндров и приводится во вращение от распределительного вала двигателя.

Сам топливный насос представляет собой роторный насос с запорными лопастями или шестеренчатый насос, и даже при низких скоростях вращения (во время проворота двигателя стартером) подает топливо в количестве, достаточном для надежного пуска двигателя. Подача топлива пропорциональна скорости вращения.

Насос содержит ряд клапанов и дросселирующих каналов. Максимальное количество подаваемого топлива ограничивается дросселирующим каналом на стороне всасывания. Максимальное давление в ступени высокого давления ограничивается клапаном сброса давления. Пузырьки паров топлива уничтожаются в дросселирующем канале линии возврата топлива. В случае попадания в топливную систему воздуха (например, при полном опорожнении топливного бака) клапан регулирования низкого давления остается закрытым. Воздух вытесняется из топливной системы через перепускной канал давлением топлива.

Пример использования: на легковых автомобилях, совместно с системами впрыска топлива с использованием насос-форсунок.

Клапан регулирования низкого давления

Клапан регулирования низкого давления (см. рис. 9), также называемый перепускным огра-

Рис. 8. Сдвоенный топливный насос:
1 – возврат в топливный бак; 2 – подача топлива из бака, 3 – насосный элемент (шестеренчатый насос); 4 – дросселирующий канал, 5 – фильтр; 6 – дроссель на стороне всасывания, 7 – клапан сброса давления; 8 – соединитель для измерения давления; 9 – подача топлива к форсункам; 10 – возврат топлива из форсунок; 11 – обратный клапан, 12 – перепускной канал

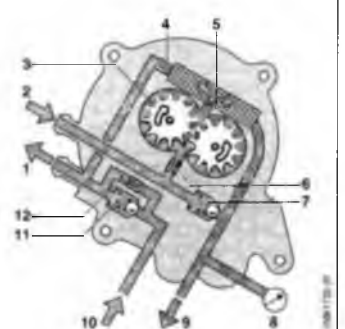


Рис. 7. Роторный насос с запорными лопастями (схематическое изображение):
1 – ротор; 2 – сторона всасывания (впуск); 3 – пружина; 4 – запорная лопасть, 5 – сторона нагнетания

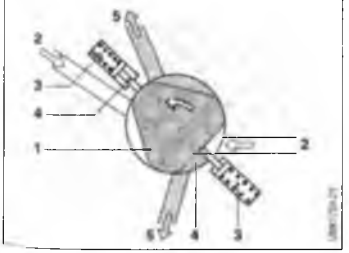
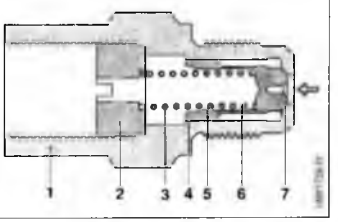


Рис. 9. Клапан регулирования давления:
1 – корпус клапана; 2 – резьбовая часть; 3 – пружина сжатия; 4 – уплотнение; 5 – плунжер аккумулятора; 6 – объем аккумулятора; 7 – коническое седло



ничителем, устанавливается в линии возврата топлива. Он обеспечивает требуемое рабочее давление в ступени низкого давления в системе впрыска топлива с насос-форсунками при любых рабочих условиях и равномерное наполнение насос-форсунок топливом.

Плунжер аккумулятора клапана открывается при давлении 300–350 кПа (3–3,5 бар). Небольшие колебания давления в объеме аккумулятора компенсируются пружиной. При давлении 4–4,5 бар открывается уплотнение, что вызывает заметное увеличение расхода.

Для установки значения давления открытия служат два регулировочных винта.

Охладитель топлива

Высокое давление в форсунках в системах впрыска топлива с насос-форсунками для легковых автомобилей и в некоторых системах с общей топливной магистралью вызывает столь интенсивный нагрев топлива, что перед его возвратом в топливный бак требуется охлаждение. Топливо, возвращаемое из форсунок в топливный бак, проходит через охладитель (теплообменник) и отдает тепло охлаждающей жидкости, циркулирующей в контуре охлаждения топлива. Этот контур отделен от системы охлаждения двигателя, поскольку при нормальной рабочей температуре двигателя температура жидкости в системе охлаждения двигателя слишком высока для охлаждения топлива. Контур охлаждения топлива соединяется с системой охлаждения двигателя у расширительного бачка. Бачок обеспечивает заполнение контура охлаждения топлива охлаждающей жидкостью и компенсирует любые изменения, вызванные колебаниями температуры (см. рис. 10).



Рис. 10: Контур охлаждения топлива:
1 – насос подачи топлива; 2 – датчик температуры топлива; 3 – охладитель топлива; 4 – топливный бак; 5 – расширительный бачок, 6 – контур охлаждения двигателя; 7 – охлаждающий насос ; 8 – дополнительный охладитель

Система фильтрации топлива

Функция

Так же как для двигателей с искровым зажиганием, для дизельных двигателей необходимо обеспечить защиту топливной системы от загрязнения. Загрязнения могут проникнуть в топливную систему во время заправки автомобиля или попасть в топливный бак через систему вентиляции топливного бака. Функция топливного фильтра заключается в фильтрации твердых частиц с целью защиты от повреждения системы впрыска топлива.

По сравнению с системами впрыска топлива двигателей с искровым зажиганием системы впрыска топлива дизельных двигателей, в связи с очень высокими давлениями впрыска, требуют повышенной защиты от износа и более высокой степени фильтрации топлива. Кроме того, степень загрязнения дизельного топлива, как правило, значительно выше, чем у бензина.

Конструкция

Топливные фильтры дизелей выполняются быстросменными (см. рис. 11). В качестве сменных элементов широко применяются быстросменные фильтры с болтовым креплением, проходные фильтры и неметаллические фильтрующие элементы, устанавливаемые в корпусах из алюминия, пластмассы или листовой стали (в соответствии с повышенными требованиями к предотвращению тяжелых последствий при столкновениях). Предпочтение отдается спиральным, V-образным фильтрующим элементам. Фильтры дизельного топлива устанавливаются в контуре низкого давления: в системах всасывания перед насосом подачи топлива, а в системах нагнетания – после электрического топливного насоса. В настоящее время имеет место тенденция к установке фильтра в системах нагнетания.

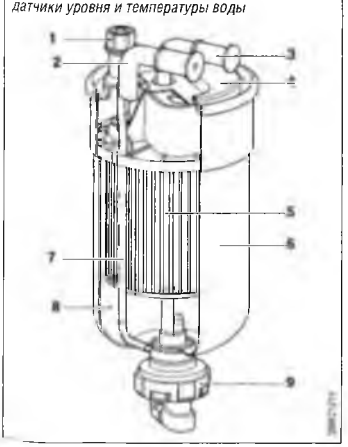
Конструктивные требования

В течение нескольких последних лет требования к тонкости фильтрации стали более строгими в связи с появлением систем с общей топливной магистралью с более высокими давлениями впрыска и новейших систем впрыска топлива с насос-форунками для легковых и коммерческих автомобилей. В зависимости от условий эксплуатации (степени

загрязнения топлива, продолжительности периодов простоя двигателя и т.д.) для новых систем требуется степень фильтрации 85 и 98,6 % (частиц размером 3–5 мкм, см. стандарт ISO/TR 13353: 1994). Топливные фильтры, устанавливаемые на автомобили последних поколений, в связи с увеличенными интервалами замены, должны быть способны накапливать бóльшие объемы частиц и эффективно задерживать частицы сверхмалого размера. Этого можно достигнуть, только используя специальные фильтрующие среды, например, состоящие из большого количества слоев синтетического микроволокна. Например, это могут быть многослойные синтетические микроволокна, гарантирующие максимальную степень удерживания частиц путем отделения их от топлива внутри отдельных слоев фильтрующего материала.

В настоящее время типичные интервалы замены фильтрующих элементов составляют от 60 000 до 90 000 км пробега. В регионах с плохим качеством дизельного топлива, таких как Восточная Европа, Китай, Индия и США, эти интервалы значительно короче. При использовании биодизельного топлива рекомендуется сократить интервалы замены в два раза.

Рис. 11. Фильтр дизельного топлива:
1 – пробка для слива воды; 2 – впуск топлива; 3 – выпуск топлива; 4 – крышка фильтра с цинковым покрытием; 5 – радиальный V-образный фильтрующий элемент с двухслойной фильтрующим материалом; 6 – стойкий к сжатию корпус с алюминиево-цинковым покрытием с обеих сторон); 7 – сливная трубка; 8 – камера сбора воды; 9 – датчики уровня и температуры воды



Отделение воды

Другой важной функцией топливного фильтра для дизельного двигателя является удаление из топлива разного рода эмульсий и воды с целью предотвращения коррозии. Эффективное отделение не менее 93 % воды при номинальном расходе (испытания в соответствии с ISO 4020) особенно важно для распределительных топливных насосов высокого давления и систем с общей топливной магистралью. Отделение воды осуществляется посредством коалесценции на фильтрующем материале (образования капель воды вследствие различных поверхностных натяжений воды и топлива). Вода скапливается в камере в нижней части корпуса фильтра (см. рис. 11). В некоторых случаях для контроля уровня воды используются датчики проводимости. Вода сливается вручную через сливную пробку или электромагнитный клапан, управляемый кнопкой.

На автомобилях, предназначенных для эксплуатации в особо тяжелых условиях, на стороне всасывания устанавливается дополнительный фильтр грубой очистки с водоотделителем. Тонкость фильтрации фильтра соответствует тонкости фильтрации фильтра тонкой очистки. Такие фильтры грубой очистки в основном устанавливаются на коммерческих автомобилях, предназначенных для эксплуатации в странах, где имеет место низкое качество дизельного топлива.

Дополнительные функции

Топливные фильтры последнего поколения обладают дополнительными функциями, такими как подогрев топлива для предотвращения закупоривания парафином в условиях низких температур. Подогрев топлива может осуществляться электрическим нагревателем или горячим топливом, возвращаемым из двигателя. В первом случае в фильтре устанавливаются нагреватели типа PTC (с положительным температурным коэффициентом). Во втором случае требуется установка клапана с биметаллическим элементом или воскового термоэлемента, открывающегося при низких температурах и позволяющего топливу возвращаться к фильтру.

К дополнительным функциям также относятся индикация необходимости замены посредством измерения перепада давления и удаления из системы воздуха.

Система впрыска топлива Common Rail

Обзор системы

Требования

Требования, предъявляемые к системам впрыска топлива, непрерывно возрастают. Возросшие давления, малое время переключения и адаптация количества подаваемого топлива к условиям работы двигателя сделали двигатель экономичным, чистым и мощным.

Основным преимуществом системы впрыска топлива с общей топливной рампой (Common Rail) является ее способность в широком диапазоне изменять давление впрыска топлива, его момент и продолжительность. Это достигается за счет разделения систем создания давления (в насосе высокого давления) и впрыска топлива (форсунки). Здесь в качестве аккумулятора давления действует топливная рампа (см. рис. 1).

Система впрыска топлива Common Rail является чрезвычайно гибкой системой, позволяющей адаптировать процесс впрыска топлива к двигателю. Это достигается за счет
- адаптации давления впрыска к условиям работы двигателя (200–2 200 бар);
- регулирования момента начала впрыска;
- возможности использования многоступенчатого впрыска топлива (в том числе вторичного впрыска топлива со значительным запаздыванием).

Таким образом, система впрыска топлива Common Rail для дизельных двигателей позволяет повысить эффективную мощность двигателя, снизить уровень шума и содержание вредных веществ в отработавших газах.

Система Common Rail в настоящее время является наиболее распространенной системой впрыска топлива для современных легковых и коммерческих автомобилей с дизельными двигателями.

Конструкция

Система впрыска топлива Common Rail включает следующие основные функциональные группы (см. рис. 1): систему низкого давления, включающую компоненты системы подачи топлива, систему высокого давления, включающую насос высокого давления, топливную рампу, форсунки, топливопроводы высокого давления и электронную систему управления двигателем (EDC).

Основными компонентами системы Common Rail являются форсунки, соединенные с топливной рампой. Форсунка снабжена быстродействующим клапаном (электромагнитным клапаном или клапаном с пьезоэлектрическим приводом), который открывает и закрывает сопло. Это позволяет управлять процессом впрыска топлива в каждый цилиндр.

Рис. 1. Часть системы управления двигателем, относящаяся к системе Common Rail:
1 – насос высокого давления; 2 – топливная рампа; 3 – форсунки



Подача топлива

В системах впрыска топлива Common Rail для легковых автомобилей и легких коммерческих автомобилей для подачи топлива к насосу высокого давления используются электрические или шестеренчатые топливные насосы. На тяжелых коммерческих автомобилях используются исключительно шестеренчатые топливные насосы (см. «Подача топлива»).

Системы с электрическим топливным насосом

Электрический топливный насос устанавливается в топливном баке или встраивается в линию подачи топлива. Насос всасывает топливо через фильтр грубой очистки и подает его к насосу высокого давления под давлением 6 бар (см. рис. 2, a и 2, c). Максимальная производительность насоса составляет 190 л/ч. Для обеспечения быстрого пуска двигателя насос включается, как только водитель включает зажигание.

Системы с шестеренчатым топливным насосом

Шестеренчатый топливный насос крепится на фланце к насосу высокого давления и приводится во вращение его входным валом (см. рис.2, b). Отсюда следует, что шестеренчатый топливный насос начинает действовать только после пуска двигателя. Производительность насоса зависит от частоты вращения коленчатого вала и достигает 400 л/ч при давлении до 7 бар.

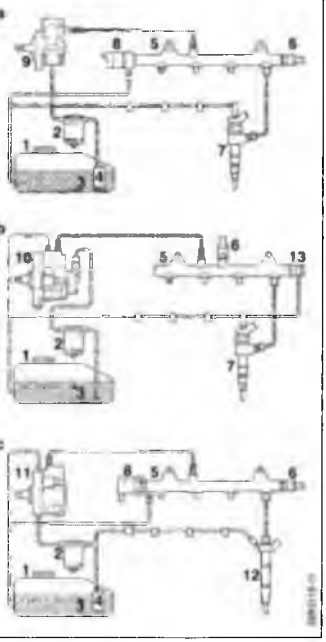
Комбинированные системы

Существуют также системы с насосами обоих типов. Электрический топливный насос улучшает условия пуска двигателя, в особенности прогретого, поскольку, горячее топливо имеет низкую вязкость, при которой производительность шестеренчатого топливного насоса снижается. Кроме того, как уже говорилось, шестеренчатый насос имеет низкую производительность при малых скоростях вращения.

Фильтрация топлива

В отличие от легковых автомобилей, на коммерческих автомобилях топливный фильтр (фильтр тонкой очистки) устанавливается на стороне нагнетания. По этой причине требуется впуск топлива в топливный фильтр снаружи, в частности, когда шестеренчатый топливный насос крепится на фланце к насосу высокого давления (см. рис. 3).

Рис. 2. Системы впрыска топлива Common Rail для легковых автомобилей (примеры):
a – радиально-поршневой насос с непрерывной подачей топлива: регулирование давления на стороне высокого давления при помощи клапана регулирования давления; b – регулируемый по потребности радиально-поршневой насос: регулирование давления на стороне всасывания при помощи дозирующего устройства, установленного на фланце насоса высокого давления; c – регулируемый по потребности радиально-поршневой насос: система с двумя исполнительными устройствами – дозирующим устройством на стороне всасывания и клапаном регулирования давления на стороне высокого давления; 1 – топливный бак; 2 – топливный фильтр, 3 – фильтр грубой очистки; 4 – электрический топливный насос; 5 – топливная рампа; 6 – датчик давления в топливной рампе; 7 – форсунка с электромагнитным клапаном; 8 – клапан регулирования давления; 9 – насос высокого давления с непрерывной подачей топлива, 10 – насос высокого давления с насосом низкого давления и дозирующим устройством; 11 – насос высокого давления с дозирующим устройством; 12 – пьезоэлектрическая форсунка; 13 – ограничитель давления



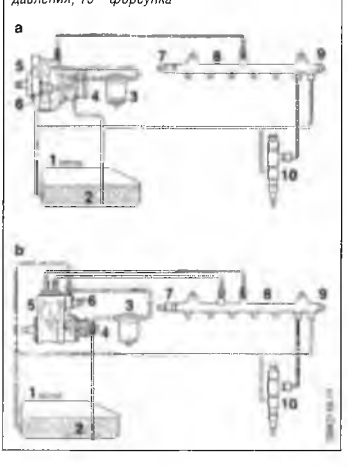
Создание давления

В аккумуляторных системах впрыска топлива Common Rail функции создания давления и впрыска топлива разделены. Давление впрыска создается независимо от частоты вращения коленчатого вала и количества впрыскиваемого топлива. Управление всеми компонентами осуществляет электронная система управления дизельным двигателем (EDC).

Функции создания давления и впрыска топлива разделяются аккумуляторным объемом топливной рампы. Топливо под давлением, готовое к впрыску, находится в аккумуляторной топливной рампе.

Требуемое давление впрыска создается непрерывно работающим насосом высокого давления с приводом от двигателя. Давление в топливной рампе поддерживается независимо от частоты вращения коленчатого вала.

Рис. 3. Системы впрыска топлива Common Rail для коммерческих автомобилей (примеры):
a – регулируемый по потребности радиально-поршневой насос с регулированием давления на стороне всасывания при помощи дозирующего устройства; b – регулируемый по потребности радиально-поршневой насос с регулированием давления на стороне всасывания при помощи дозирующего устройства, 1 – топливный бак, 2 – фильтр грубой очистки; 3 – топливный фильтр; 4 – шестеренчатый насос низкого давления; 5 – насос высокого давления, 6 – дозирующее устройство: 7 – датчик давления в топливной рампе, 8 – топливная рампа; 9 – ограничитель давления; 10 – форсунка



Насос высокого давления представляет собой радиально-поршневой насос. На коммерческих автомобилях иногда устанавливается проходной топливный насос высокого давления.

Регулирование давления

Регулирование давления может осуществляться различными способами.

Регулирование на стороне высокого давления

Требуемое давление в топливной рампе регулируется на стороне высокого давления при помощи клапана регулирования давления (см. рис. 2, a). Через клапан регулирования давления топливо, которое не требуется для впрыска, возвращается в контур низкого давления. Такая система регулирования обеспечивает быструю реакцию на изменения условий работы двигателя (например, изменения нагрузки).

Регулирование подачи топлива на стороне всасывания

Другим способом регулирования давление в топливной рампе является регулирование подачи топлива на стороне всасывания (см. рис. 2, b и 3). Дозатор, установленный на фланце насоса высокого давления, обеспечивает подачу топлива в топливную рампу в строгом соответствии с требуемым давлением впрыска. В случае неисправности дозатора клапан сброса давления предотвращает превышение максимально допустимого давления.

Регулирование подачи топлива на стороне всасывания позволяет уменьшить количество топлива, находящегося под давлением, и мощность насоса. Это положительно влияет на расход топлива. В то же время температура возвращаемого в топливный бак топлива ниже по сравнению с регулированием на стороне высокого давления.

Комбинированная система регулирования давления

Комбинированная система регулирования давления (см. рис. 2, c) сочетает регулирование на стороне всасывания при помощи дозатора с регулированием на стороне высокого давления при помощи клапана регулирования давления, что позволяет использовать преимущества каждого из этих способов. Еще одним преимуществом по сравнению с регулированием только на стороне низкого давления является то, что на холодном двигателе в этом случае

контролируется также сторона высокого давления. Насос высокого давления подает больше топлива, чем требуется для впрыска, и давление регулируется клапаном регулирования давления. В результате сжатия топливо нагревается, что исключает необходимость в дополнительном подогревателе топлива.

Впрыск топлива

Форсунки впрыскивают топливо непосредственно в камеры сгорания двигателя. Топливо подается к форсункам по коротким шлангам высокого давления, присоединенным к топливной рампе. Управление открытием и закрытием форсунок осуществляется блоком управления двигателем.

Количество впрыскиваемого топлива определяется давлением в системе и продолжительностью открытого состояния форсунки. При постоянном давлении количество впрыскиваемого топлива пропорционально продолжительности включения электромагнитного клапана. В этом случае оно не зависит от частоты вращения коленчатого вала и скорости вращения насоса (впрыск топлива по времени).

Перспективы системы

Разделение функций создания давления и впрыска топлива открывает дополнительные возможности оптимизации процессов сгорания топлива по сравнению в обычными системами впрыска топлива; давление впрыска может относительно свободно выбираться в пределах программной карты.

Применение систем впрыска топлива Common Rail позволяет еще более снизить содержание вредных веществ в отработавших газах за счет многократного впрыска топлива и значительно уменьшить уровень шума, генерируемого в процессе сгорания топлива. Многократный впрыск (до шести впрысков в течение одного цикла) можно осуществлять посредством многократного включения/выключения быстродействующего электромагнитного клапана форсунки. Для ускорения закрытия клапана и быстрого прекращения впрыска может использоваться гидравлическое давление.

Системы управления и регулирования

Принцип действия:

Блок управления двигателем определяет положение педали подачи топлива и рабочие состояния двигателя и автомобиля при помощи различных датчиков (см. «Электронная система управления дизельным двигателем»). Поступающие на блок данные включают: скорость вращения и угол поворота коленчатого вала; давление в топливной рампе, давление всасываемого воздуха; температуру всасываемого воздуха, охлаждающей жидкости и топлива; массовый расход воздуха и скорость вращения колес (для вычисления скорости движения автомобиля). Электронный блок управления выполняет обработку входных сигналов. В режиме реального времени он осуществляет управление клапаном регулирования давления или дозатором, форсунками и иными исполнительными механизмами (например, клапаном системы рециркуляции отработавших газов, турбонагнетателем и т.д.).

Основные функции

Основные функции заключаются в точном регулировании продолжительности впрыска и количества впрыскиваемого топлива при постоянном давлении. Это обеспечивает низкий расход топлива и стабильность рабочих характеристик.

Функции коррекции для вычисления параметров впрыска топлива

Функции коррекции служат для компенсации разброса параметров компонентов система впрыска топлива и двигателя.

- Компенсация разброса подачи топлива форсункой: коррекция разброса подачи топлива новыми форсунками с использованием данных испытаний, выполненных на заводе-изготовителе, записанных в память блока управления.
- Калибровка нулевой подачи топлива: компенсация дрейфа количества впрыскиваемого топлива с использованием коротких тестовых впрысков и оценки сигнала скорости в режиме высокого разрешения по времени.
- Контроль баланса топлива: разброс параметров компонентов системы впрыска топлива и двигателя вызывает различия значений крутящего момента, создаваемого отдельными цилиндрами. Коррекция количества впрыскиваемого топлива вычисляется, исходя из возникающего в результате этого разброса колебаний скорости вращения.
- Адаптация среднего значения количества топлива: среднее значение количества впрыскиваемого топлива вычисляется по сигналам кислородного датчика, датчика массового расхода топлива и датчика массового расхода воздуха. Величина коррекции вычисляется посредством сравнения значения уставки с фактическими значениями.

Дополнительные функции

Дополнительные функции регулирования в режиме регулиования с обратной связью и без обратной связи выполняют задачи снижения содержания вредных веществ в отработавших газах и расхода топлив, или обеспечения дополнительного комфорта и безопасности. Некоторыми примерами являются:

- управление системой рециркуляции отработавших газов;
- управление процессом наддува в двигателе;
- управление системой круиз-контроля;
- управление электронным иммобилайзером.

Интеграция электронной системы управления дизельным двигателем в общую сеть автомобиля облегчает обмен данными с другими системами, например, системой управления трансмиссией или системой кондиционирования воздуха. Диагностический интерфейс облегчает анализ данных при поиске неисправностей.

Форсунки

Форсунки с электромагнитным клапаном

Конструкция и принцип действия

Форсунка с электромагнитным клапаном включает несколько функциональных модулей: распылитель, гидравлическая сервосистема и электромагнитный клапан.

Из магистрали высокого давления (см. рис. 4. а) топливо по впускному каналу поступает к распылителю и далее через дроссельное отверстие подачи топлива в камеру управления клапаном. Камера управления клапаном может через дроссельное отверстие подачи топлива соединяться электромагнитным клапаном с линией возврата топлива.

Во время работы двигателя и насоса высокого давления форсунка может находиться в одном из четырех положений. Рабочие положения форсунки определяются балансом сил, воздействующих на компоненты форсунки. Пружина форсунки закрывает форсунку, когда двигатель не работает, и давление в топливной рампе отсутствует (положение покоя).

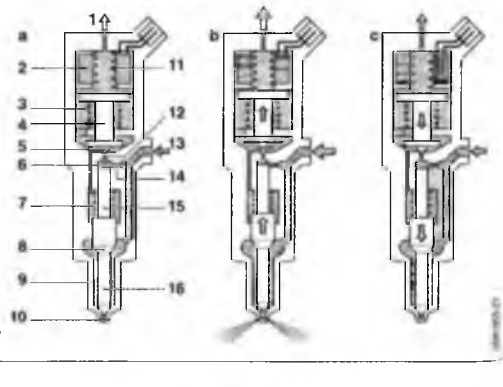
Форсунка закрыта (положение покоя)

В положении покоя форсунка закрыта (см. рис. 4, а). Пружина электромагнитного клапана прижимает шарик клапана к седлу дроссельного отверстия подачи топлива. При этом величина давления в камере управления клапаном повышается до давления в топливной рампе. Такое же давление присутствует в камере распылителя. Силы, воздействующие на торцевые поверхности управляющего плунжера (давление в топливной рампе и усилие пружины распылителя) удерживают иглу распылителя в закрытом положении, преодолевая открывающее усилие, воздействующее на нажимной буртик иглы.

Открытие форсунки (начало впрыска)

Форсунка находится в положении покоя. В обмотку электромагнитного клапана подается

Рис. 4. Принцип действия форсунки с электромагнитным клапаном:
a – положение покоя; b – открытие форсунки; c – закрытие форсунки,
1 – возврат топлива; 2 – обмотка электромагнита; 3 – предохранительная пружина;
4 – якорь электромагнита;
5 – шарик клапана;
6 – камера управления клапаном;
7 – пружина распылителя,
8 – нажимной буртик иглы распылителя,
9 – камера распылителя;
10 – распыляющее отверстие;
11 – пружина электромагнитного клапана;
12 – дроссельное отверстие отвода топлива;
13 – магистраль высокого давления,
14 – дроссельное отверстие подачи топлива,
15 – плунжер клапана (регулирующий плунжер),
16 – игла распылителя



«пусковой ток». Это вызывает очень быстрое открытие электромагнитного клапана (см. рис. 4, b). Требуемое высокое быстродействие достигается за счет подачи на обмотку клапана высокого напряжения.

Возникающая электромагнитная сила превышает усилие пружины электромагнитного клапана. Якорь электромагнита поднимает шарик клапана из седла и открывает дроссельное отверстие отвода топлива. Через короткое время ток в обмотке снижается до величины тока удержания. Когда дроссельное отверстие отвода топлива открыто, топливо поступает из камеры управления клапаном в полость над ней, и по возвратному топливопроводу возвращается в топливный бак. Дроссельное отверстие подачи топлива препятствует полной компенсации давления, в результате чего давление в камере управления клапаном снижается. Давление в камере управления клапаном падает ниже давления в камере распылителя, которое остается таким же, как давление в топливной рампе. Понижение давления в камере управления клапаном вызывает уменьшение усилия, воздействующего на управляющий плунжер, в результате чего игла распылителя поднимается, и форсунка открывается. Начинается впрыск топлива.

Форсунка полностью открыта

Скорость перемещения иглы распылителя определяется разностью потоков топлива, протекающих через дроссельные отверстия отвода и подачи топлива. Управляющий плунжер достигает крайнего верхнего положения и упирается в подушку из топлива (гидравлический упор). Эта подушка создается потоком топлива между дроссельными отверстиями подачи и отвода топлива. Распылитель форсунки полностью открыт. Топливо впрыскивается в камеру сгорания под давлением, близким к давлению в топливной рампе.

Баланс сил в форсунке на этой стадии аналогичен балансу сил на стадии открытия. При данном давлении в системе количество впрыскиваемого топлива пропорционально продолжительности открытого состояния электромагнитного клапана. При этом оно совершенно не зависит от скорости вращения коленчатого вала или насоса.

Закрытие форсунки (конец впрыска)

Когда электромагнитный клапан обесточивается, пружина сдвигает якорь электромагнита вниз, и шарик клапана закрывает дроссельное отверстие отвода топлива (см. рис. 1, c). Когда дроссельное отверстие отвода топлива закрывается, давление в камере управления через дроссельное отверстие подачи топлива снова возрастает до величины давления в топливной рампе. Это вызывает увеличение усилия, воздействующего на управляющий плунжер. Усилие, создаваемое давлением в камере управления, и усилие пружины превышают усилие, воздействующее на иглу распылителя, и игла распылителя закрывает форсунку. Скорость, с которой закрывается игла, определяется потоком топлива через дроссельное отверстие подачи топлива. Когда игла прижимается к седлу, перекрывая таким образом отверстие распылителя, цикл впрыска заканчивается.

Этот косвенный метод используется для перемещения иглы распылителя при помощи гидравлической сервосистемы, поскольку усилия, требуемые для быстрого открытия, не могут быть созданы только электромагнитным клапаном. Топливо, требуемое для управления, проходит через дроссельные отверстия камеры управления и возвращается в топливный бак.

Варианты форсунок

Имеются два варианта форсунок с электромагнитным клапаном:

- форсунки с нагруженным давлением шаровым клапаном (усилия, действующие на клапан, направлены противоположно прилагаемому давлению в топливной рампе);
- форсунки со скомпенсированным по давлению клапаном (усилия, действующие на клапан, практически не зависят от давления в топливной рампе).

Фирма Bosch предлагает форсунки со скомпенсированным по давлению клапаном для дизельных двигателей легковых автомобилей, рассчитанные на давление в топливной рампе до 1600 бар. При помощи таких клапанов можно обеспечить выполнение требований, предъявляемых к форсункам современных дизельных двигателей, поскольку максимальное сечение открытого клапана может быть получено также при давлениях свыше 1600 бар в целях обеспечения гидравлической стабильности сервоклапана, при помощи которого регулируется величина подъема иглы. Кроме того, при высоком давлении в топливной рампе величина подъема иглы значительно уменьшается, что позволяет достигнуть требуемого быстродействия при давлениях впрыска свыше 1600 бар и снизить чувствительность клапана к внешним возмущающим воздействиям. За счет высокого

быстродействия обеспечиваются минимальные допустимые интервалы между двумя последовательными впрысками. Также может быть снижена потребляемая электромагнитным клапаном электрическая мощность.

Управление форсункой с электромагнитным клапаном

Последовательность управления форсункой с электромагнитным клапаном может быть разделена на пять стадий (см. рис. 5; приведенные ниже детали относятся к форсунке с нагруженным давлением шаровым клапаном; для скомпенсированных по давлению клапанов достаточны небольшие значения тока).

Вначале, в целях обеспечения точности и повторяемости дозирования топлива в обмотку электромагнитного клапана подается пусковой ток, значение которого очень быстро возрастает приблизительно до 20 А. Это достигается за счет подачи увеличенного напряжения (до 50 В), генерируемого в электронном блоке управления и накапливаемого в конденсаторе. При подаче такого напряжения на обмотку электромагнитного клапана ток возрастает в несколько раз быстрее, чем при использовании только напряжения аккумуляторной батареи.

В течение фазы пускового тока на электромагнитный клапан подается напряжение аккумуляторной батареи, что способствует быстрому открытию клапана. Регулятор тока ограничивает величину пускового тока приблизительно до 20 А.

С целью снижения энергопотребления электронного блока управления и форсунок, после открытия форсунки величина тока снижается приблизительно до 13 А (ток удержания). Высвобождающаяся при этом энергия используется для зарядки бустерного конденсатора.

При отключении тока для закрытия электромагнитного клапана, избыточная энергия также используется для зарядки бустерного конденсатора. Зарядка конденсатора осуществляется при помощи инвертора, встроенного в электронный блок управления. Энергия, израсходованная во время фазы открытия, восполняется в начале стадии подачи пускового тока до достижения напряжения, требуемого для открытия электромагнитного клапана.

Рис. 5. Последовательность срабатывания электромагнитного клапана высокого давления при одиночном впрыске топлива:
a – фаза открытия; b – фаза пускового тока; c – переход к фазе тока удержания; d – фаза тока удержания, e – отключение



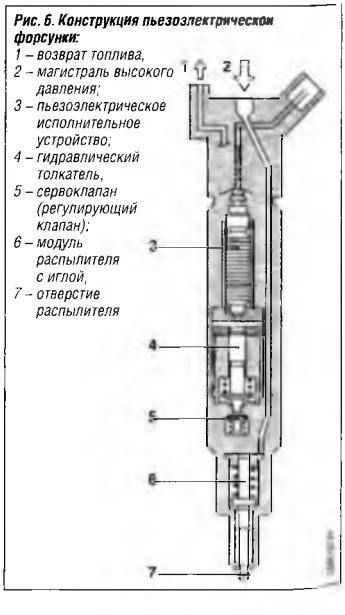
Пьезоэлектрическая форсунка

Конструкция и требования

Конструкция пьезоэлектрической форсунки включает ряд основных модулей, показанных на схематическом изображении (см. рис. 6):

– модуль исполнительного устройства;

Рис. 6. Конструкция пьезоэлектрической форсунки:
1 – возврат топлива, 2 – магистраль высокого давления; 3 – пьезоэлектрическое исполнительное устройство; 4 – гидравлический толкатель, 5 – сервоклапан (регулирующий клапан); 6 – модуль распылителя с иглой, 7 – отверстие распылителя



- гидравлический толкатель;
- модуль управления сервоклапаном;
- модуль распылителя.

Прямая реакция иглы на срабатывание исполнительного устройства достигается путем соединения сервоклапана с иглой распылителя. Величина задержки между электрическим включением и гидравлической реакцией иглы распылителя составляет около 150 микросекунд. В то же время, благодаря большому усилию, создаваемому пьезоэлектрическим исполнительным устройством, время переключения сервоклапана составляет всего 50 микросекунд. Это позволяет выполнить противоречивые требования в отношении высоких скоростей перемещения иглы и чрезвычайно малых воспроизводимых количеств впрыскиваемого топлива.

Аналогично форсунке с электромагнитным клапаном, для активации впрыска управляющий объем топлива выпускается через клапан. Однако, пьезоэлектрическая форсунка не содержит точек утечки топлива из контура высокого давления в контур низкого давления. Результатом является повышение гидравлической эффективности всей системы.

Количество впрысков топлива в течение одного цикла впрыска может достигать пяти и более, и таким образом, может быть адаптировано к условиям работы двигателя, когда максимальное возможное количество впрысков уменьшается в верхней части диапазона частоты вращения коленчатого вала.

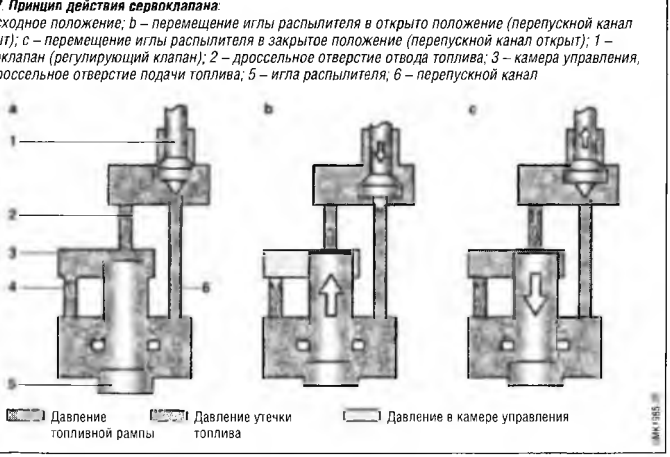
Принцип действия сервоклапана

Сервоклапан осуществляет непрямое управление иглой распылителя пьезоэлектрической форсунки. Желаемое количество впрыскиваемого топлива задается с учетом преобладающего давления в топливной рампе, которое регулируется посредством изменения продолжительности активации клапана. В деактивированном состоянии исполнительное устройство находится в исходном положении, и сервоклапан закрыт (см. рис.7, a), т.е. секция высокого давления отделена от секции низкого давления. Распылитель остается закрытым под действием давления в топливной рампе, равному давлению в камере управления.

При срабатывании исполнительного устройства сервоклапан открывается и перекрывает перепускной канал (см. рис. 7, b). Возникновение потока топлива между дроссельными отверстиями подачи и отвода топлива вызывает понижение давления в камере управления, и сопло открывается. Объем топлива в камере управления через сервоклапан перетекает в контур низкого давления, а оттуда возвращается в топливный бак.

Чтобы начать процесс закрытия форсунки, напряжение, поданное на исполнительное устройство, отключается, и сервоклапан закрывается, одновременно открывая перепускной канал. Ка-

Рис. 7. Принцип действия сервоклапана:
a – исходное положение; b – перемещение иглы распылителя в открыто положение (перепускной канал закрыт); c – перемещение иглы распылителя в закрытое положение (перепускной канал открыт); 1 – сервоклапан (регулирующий клапан); 2 – дроссельное отверстие отвода топлива; 3 – камера управления, 4 – дроссельное отверстие подачи топлива; 5 – игла распылителя; 6 – перепускной канал



мера управления снова заполняется топливом (впускные и выпускные дроссельные отверстия меняются местами), и игла снова закрывает распылитель. Процесс впрыска заканчивается, как только игла распылителя достигает седла.

Принцип действия гидравлического толкателя

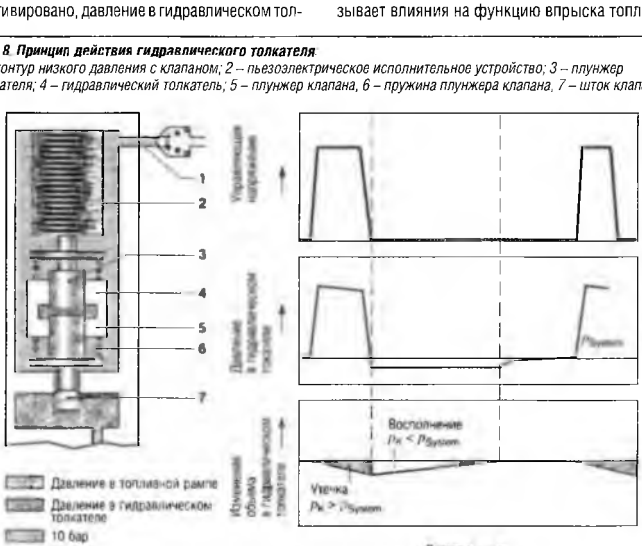
Еще одним важным компонентом пьезоэлектрической форсунки является гидравлический толкатель (см. рис. 8). Он обеспечивает компенсацию изменений длины металлических и керамических компонентов (например, вызванных различными коэффициентами температурного расширения металла и керамики или сжимающими усилиями, воздействующими на корпус держателя). В то же время он осуществляет преобразование величины рабочего хода и усилия исполнительного устройства до уровней, требуемых на стороне клапана. Соотношение преобразования определяется диаметрами плунжеров толкателя и клапана.

Модуль исполнительного устройства и гидравлический толкатель погружены в поток дизельного топлива, который проходит через контур низкого давления и находится под давлением около 10 бар. Когда исполнительное устройство деактивировано, давление в гидравлическом толкателе находится в равновесии с внешним давлением, и гидравлический толкатель не прилагает каких-либо усилий к штоку клапана. Изменения длины, вызванные изменениями температуры или сжимающими усилиями, воздействующими на корпус держателя, компенсируются за счет небольших потоков утечки топлива через зазоры в направляющих двух плунжеров. Это обеспечивает постоянное соединение исполнительного устройства и переключающего клапана.

Для осуществления впрыска топлива на исполнительное устройство подается напряжение величиной 110–160 В. Это вызывает повышение давления в гидравлическом толкателе и возникновение усилия, воздействующего на шток клапана. Если это усилие превышает закрывающее усилие давления в топливной рампе, переключающий клапан открывается. За счет более высокого давления в толкателе по сравнению с внешним давлением, через зазоры в направляющих плунжеров из толкателя в контур низкого давления форсунки (10 бар) протекает небольшой поток утечки. Даже когда гидравлический толкатель повторно приводится в действие в течение цикла сгорания топлива общей продолжительностью до двух миллисекунд, это не оказывает влияния на функцию впрыска топлива.

Рис. 8. Принцип действия гидравлического толкателя

1 – контур низкого давления с клапаном; 2 – пьезоэлектрическое исполнительное устройство; 3 – плунжер толкателя; 4 – гидравлический толкатель; 5 – плунжер клапана, 6 – пружина плунжера клапана, 7 – шток клапана



По окончании процесса впрыска происходит восполнение количества топлива, утекшего из гидравлического толкателя. При этом топливо поступает через зазоры в направляющих плунжеров в обратном направлении. При этом пружина плунжера клапана создает внутри гидравлического толкателя разрежение относительно давления в окружающем пространстве. Величины зазоров и уровень низкого давления выбраны таким образом, чтобы гидравлический толкатель успел полностью заполниться топливом перед началом следующего цикла сгорания топлива.

Насосы высокого давления

Конструкция и требования

Насос высокого давления является устройством сопряжения между ступенями высокого и низкого давления. Его функцией является обеспечение системы впрыска топлива достаточным количеством топлива под давлением при любых условиях работы двигателя. Насос должен бесперебойно работать на протяжении всего срока службы двигателя. Насос также должен обеспечивать запас топлива, требуемый для быстрого пуска двигателя и быстрого повышения давления в топливной рампе.

Насос высокого давления создает в системе постоянное давление, которое поддерживается аккумулятором высокого давления (топливной рампой) независимо от процесса впрыска топлива. В отличие от обычных систем впрыска топливо во время впрыска не сжимается.

В качестве насосов высокого давления для легковых автомобилей используются трех, двух- и одноплунжерные радиально-поршневые насосы. На коммерческих автомобилях устанавливаются также двухплунжерные рядные насосы.

Как правило, насос высокого давления устанавливается на дизельном двигателе в том же месте, что и обычный распределительный топливный насос. Привод насоса осуществляется от двигателя при помощи соединительной муфты, зубчатой передачи, цепной передачи или зубчатого приводного ремня. Поэтому скорость вращения насоса жестко связана с частотой вращения коленчатого вала фиксированным передаточным отношением.

На легковых и коммерческих автомобилях применяются насосы высокого давления различных конструкций. В настоящее время производительность насосов высокого давления составляет 50–260 л/ч, а рабочее давление – 1350–2 200 бар. Планируется довести рабочее давление насосов следующего поколения до 2500 бар.

Трехплунжерный радиально-поршневой насос

Конструкция

По центру корпуса насоса высокого давления установлен приводной вал (см. рис. 9). Насо-

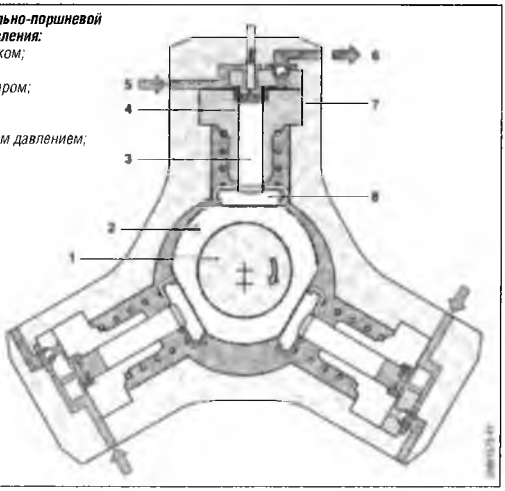


Рис. 9. Трехплунжерный радиально-поршневой топливный насос высокого давления:
1 – приводной вал с эксцентриком;
2 – многоугольное кольцо;
3 – насосный элемент с плунжером;
4 – впускной клапан;
5 – подача топлива;
6 – выпуск топлива под высоким давлением;
7 – выпускной клапан;
8 – подушка плунжера

сные элементы расположены радиально по отношению к приводному валу и смещены относительно друг друга на 120°. Многоугольное кольцо, установленное на эксцентрике приводного вала, находится в контакте с плунжерами и во время вращения вала вызывает их возвратно-поступательное движение.

Усилия передаются от эксцентрика к плунжерам при помощи скользящего многоугольного кольца, установленного на эксцентрике приводного вала, и опорных подушек плунжеров.

Подача и сжатие топлива

Подача топлива в насос высокого давление осуществляется предварительным насосом низкого давления (электрический или шестеренчатый топливный насос) через фильтр и водоотделитель. На легковых автомобилях с шестеренчатым топливным насосом, устанавливаемым на фланце насоса высокого давления, впускной канал находится внутри насоса. За впускным каналом расположен предохранительный клапан. Если давление подачи насоса низкого давления превышает давление открытия предохранительного клапана (на 0,5–1,5 бар), топливо вытесняется через ограничительное отверстие предохранительного клапана в контур смазки и охлаждения насоса высокого давления. Эксцентрик приводного вала перемещает плунжеры насоса вверх-вниз в соответствии с величиной подъема эксцентрика. Через впускной клапан насоса высокого давления топливо поступает в камеру насосного элемента, и плунжер насоса начинает движение в сторону приводного вала (ход всасывания).

После прохождения плунжером нижней мертвой точки впускной клапан закрывается, и топливо, находящееся в камере, изолируется. Теперь оно может быть сжато до давления, значительно превышающего давление подачи насоса низкого давления. Как только давление достигает требуемого уровня давления в топливной рампе, открывается выпускной клапан. Сжатое топливо выпускается в контур высокого давления. Штуцеры высокого давления трех насосных элементов соединены внутри корпуса насоса таким образом, что к топливной рампе идет только одна линия высокого давления.

Плунжер насоса продолжает подачу топлива до тех пор, пока не достигнет верхней мертвой точки (ход нагнетания). Затем давление падает, и плунжер насоса начинает движение вниз.

Когда давление в камере насосного элемента падает ниже разности давления подачи насоса низкого давления и давления открытия впускного клапана, впускной клапан открывается, и процесс повторяется.

Передаточное отношение

Производительность насоса высокого давления пропорциональна его скорости вращения. В свою очередь скорость вращения насоса зависит от частоты вращения коленчатого вала. Передаточное отношение между двигателем и насосом определяется в процессе адаптации системы впрыска топлива к двигателю с тем, чтобы ограничить избыточное количество подаваемого топлива. В то же время передаточное отношение должно быть выбрано таким, чтобы насос обеспечивал потребность двигателя в топливе при любых условиях работы. Диапазон возможных передаточных отношений между коленчатым валом и приводным валом насоса составляет от 1:2 до 5:6.

Производительность (расход)

Поскольку насос высокого давления рассчитан на высокие значения расхода, во время работы двигателя на холостом ходу или при низкой нагрузке имеет место подача избыточного количества топлива под давлением. В систе-

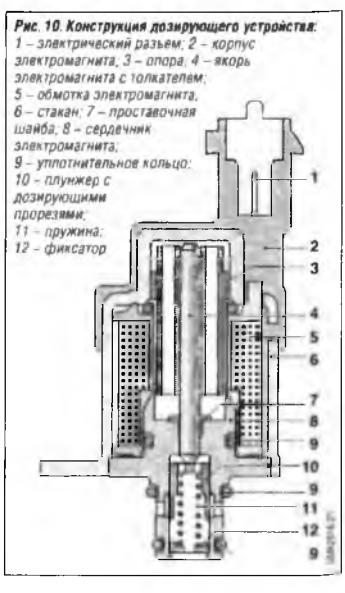


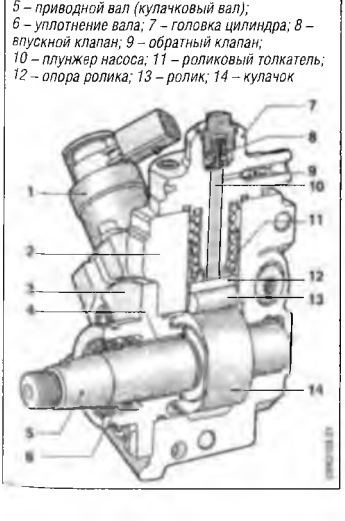
Рис. 10. Конструкция дозирующего устройства:

мах первого поколения избыточное топливо возвращается в топливный бак через клапан регулирования давления, установленный на топливной рампе или фланце насоса. При расширении сжатого топлива происходит потеря энергии сжатия. Это приводит к снижению общего к.п.д. системы. Сжатие и расширение топлива также вызывает его нагрев.

Модификации

Повышение энергетического к.п.д. системы возможно за счет регулирования расхода топлива на стороне всасывания насоса высокого давления. Количество топлива, поступающего в насосные элементы, дозируется при помощи регулируемого электромагнитного клапана (дозирующего устройства), установленного на насосе высокого давления (см. рис. 10). Этот клапан регулирует расход топлива, подаваемого в топливную рампу, в соответствии с потребностями системы. Перемещаясь под действием электромагнитной силы, плунжер дозатора открывает дозирующее отверстие в зависимости от положения прорезей в плунжере. Управление электромагнитным клапаном осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Рис. 11. Одноплунжерный радиально-поршневой насос:
1 – дозирующее устройство; 2 – корпус; 3 – монтажный фланец; 4 – подшипник качения, 5 – приводной вал (кулачковый вал); 6 – уплотнение вала; 7 – головка цилиндра; 8 – впускной клапан; 9 – обратный клапан; 10 – плунжер насоса; 11 – роликовый толкатель; 12 – опора ролика; 13 – ролик; 14 – кулачок



Такое регулирование подачи топлива не только снижает требования к рабочим характеристикам насоса высокого давления, но также позволяет снизить максимальную температуру топлива.

Одно- и двухплунжерные радиально-поршневые насосы

Конструктивные требования

Во время работы трехплунжерного насоса имеют место пульсации давления в топливной рампе, что вызывает колебания количества впрыскиваемого топлива. В связи со все более строгими требованиями к снижению токсичности отработавших газов большую важность приобретает точность впрыска топлива с минимальными колебаниями количества впрыскиваемого топлива. Одноплунжерные и двухплунжерные радиально-поршневые насосы позволяют осуществлять синхронную с впрыском подачу топлива, т.е. ходы нагнетания плунжера (плунжеров) насоса синхронизируются с тактами впуска цилиндров двигателя. Таким образом, подача топлива для каждого цилиндра осуществляется при одном и том же угле поворота коленчатого вала.

При помощи одноплунжерных или двухплунжерных насосов можно осуществлять синхронную с впрыском подачу топлива на двигателях с количеством цилиндров от трех до восьми. При этом передаточное отношение между двигателем и насосом составляет от 1:2 до 1:1.

Конструкция

Насос высокого давления представляет собой радиально-поршневой насос с повышением давления изнутри наружу, с одним или двумя плунжерами. Основные компоненты включают (см. рис. 11):

- алюминиевый корпус, в который подается топливо только под низким давлением;
- один или два насосных элемента со стойкими к высокому давлению стальными головками цилиндров, со встроенным клапаном и штуцером высокого давления;
- кулачковый узел привода с роликовым толкателем, преобразующим вращательное движение распределительного вала в возвратно-поступательное движение плунжера в головке цилиндра (двойной кулачок со смещением рабочих выступов на 180°). Кулачковый вал установлен в монтажном фланце и корпусе в двух подшипниках скольжения.

Высокое давление создается в насосном элементе. В зависимости от рабочего объема двигателя и количества цилиндров применяются

одноплунжерные или двухплунжерные насосы. Двухплунжерные насосы устанавливаются на двигателях с большим рабочим объемом. В двухплунжерном варианте насосные элементы устанавливаются в соответствии с V-образной конфигурацией, под углом 90° друг к другу.

Благодаря большому перекрытию по длине между стенкой цилиндра и плунжером насоса, потери утечки во время сжатия топлива низки. С другой стороны, короткое время утечки за счет высокой частоты подачи топлива (два рабочих хода плунжера на один оборот) и небольшой рабочий объем в головке цилиндра дают возможность дальнейшей оптимизации и, следовательно, снижения расхода топлива.

V-образная конфигурация головок цилиндров под углом 90° в двухплунжерном насосе означает отсутствие перекрытия тактов всасывания. Следовательно, обеспечивается идентичность нагнетания двух насосных элементов (т.е. равномерность подачи).

Штуцер высокого давления соединяется с топливной рампой одной (в случае одноплунжерного насоса) или двумя (в случае двухплунжерного насоса) линиями высокого давления. При этом высокое давление не аккумулируется в корпусе, а направляется из головки цилиндра наружу. Отсюда следует, что корпус насоса не требует особой прочности и стойкости к высоким давлениям.

Контур низкого давления

Все топливо, подаваемое насосом низкого давления (электрическим или шестеренчатым топливным насосом, установленным на фланце насоса высокого давления), поступает к перепускному клапану и дозирующему устройству. Поэтому объем топлива, используемого для смазки и охлаждения, больше, чем на насосах предыдущих версий.

Перепускной клапан осуществляет предварительное регулирование низкого давления, тем самым, обеспечивая определенный перепад давления между двумя подшипниками, что обеспечивает надлежащую смазку и предотвращает разрежение в подшипниках вплоть до высоких частот вращения вала.

За счет больших сечений имеет место низкое сопротивление потоку во всем тракте низкого давления, что обеспечивает заполнение насосных элементов топливом даже при высоких частотах вращения коленчатого вала. Дозирование объема осуществляется на стороне низкого давления дозирующим устройством.

Контур высокого давления

Поступающее во время фазы всасывания топливо из дозатора проходит через впускной клапан в камеру насосного элемента, сжимается во время последующей фазы нагнетания и через обратный клапан поступает по линии высокого давления в топливную рампу.

Двухплунжерный рядный поршневой насос

Конструкция

Этот смазываемый маслом регулируемый насос высокого давления, рассчитанный на давления в топливной рампе до 1600 бар, используется только на коммерческих автомобилях. Это двухплунжерный насос рядной конструкции, т.е. два насосных элемента расположены рядом с друг другом (см. рис 12).

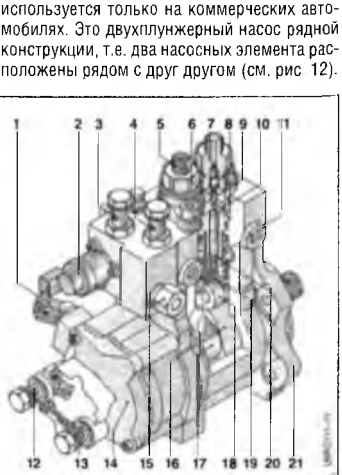


Рис. 12. Двухплунжерный рядный поршневой насос:
1 – датчик скорости (вращения насоса),
2 – дозирующее устройство;
3 – подача топлива в дозирующее устройство (из топливного фильтра),
4 – возврат топлива в топливный бак;
5 – штуцер высокого давления; 6 – корпус клапана,
7 – держатель клапана; 8 – выпускной клапан с пружиной клапана, 9 – впускной клапан с пружиной клапана; 10 – подача топлива в насосный элемент, 11 – пружина плунжера;
12 – подача топлива (из топливного бака);
13 – выпуск топлива к топливному фильтру;
14 – шестеренчатый насос низкого давления,
15 – перепускной клапан, 16 – вогнутый кулачок,
17 – кулачковый вал, 18 – ось ролика и ролик;
19 – роликовый толкатель,
20 – плунжер с графитовым покрытием,
21 – монтажный фланец

Постоянный контакт между роликовым толкателем и плунжером насоса обеспечивается пружиной плунжера. Вращательное движение распределительного вала преобразуется в возвратно-поступательное движение плунжеров насоса при помощи кулачков. Возврат плунжера осуществляется пружиной. В верхней части насосного элемента находится комбинированный впускной/выпускной клапан.

На конце распределительного вала установлен шестеренчатый насос низкого давления с высоким передаточным отношением. Его функцией является забор топлива из топливного бака и подача топлива через впускной и выпускной каналы в фильтр тонкой очистки. Оттуда топливо поступает в дозирующее устройство, находящееся в верхней части насоса высокого давления.

Смазочное масло подается непосредственно через монтажный фланец насоса или боковое впускное отверстие. Через крышку переднего подшипника масло возвращается в масляный поддон двигателя.

Принцип действия

Когда плунжер насоса перемещается из верхней мертвой точки к нижней мертвой точке, за счет давления топлива (давления предварительной подачи) открывается впускной клапан. В результате движения плунжера вниз топливо всасывается в камеру насосного элемента. Выпускной клапан закрыт пружиной клапана.

Когда плунжер насоса начинает перемещаться вверх, впускной клапан закрывается, и топливо, заключенное в камере, сжимается. По достижении уровня давления, равного давлению в топливной рампе, открывается выпускной клапан, топливо через штуцер высокого давления поступает в топливную рампу. Это приводит к повышению давления в топливной рампе, сопровождающемуся пульсациями давления. Давление в топливной рампе измеряется датчиком давления, по сигналу которого электронная система управления дизельным двигателем (EDC) вычисляет сигнал управления (ШИМ) дозирующим устройством. Дозирующее устройство осуществляет регулирование количества топлива, подаваемого для сжатия, в соответствии с текущими потребностями двигателя.

Перспективы

В настоящее время на стадии разработки находятся рядные двухплунжерные, смазываемые маслом насосы для коммерческих автомобилей с рабочим давлением до 2500 бар.

Топливная рампа

Функция

Функцией топливной рампы является поддержание высокого давления топлива. Топливная рампа также служит в качестве аккумулятора, сглаживающего пульсации давления, генерируемые насосом и возникающие в процессе впрыска топлива. Это обеспечивает поддержание давления впрыска на постоянном уровне при открытии форсунок. С одной стороны, для выполнения этого требования объем аккумуляторной рампы должен быть достаточно большим. С другой стороны, для обеспечения достаточно быстрого повышения давления при пуске двигателя он должен быть достаточно малым.

Кроме функции аккумулятора давления топливная рампа также осуществляет распределение топлива по форсункам.

Применение

Конструкция трубчатой топливной рампы может варьироваться в зависимости от различных ограничений, которые определяют, каким образом она устанавливается на двигателе. На рампе имеются соединители для установки датчика давления и ограничителя давления или клапана регулирования давления.

Топливо поступает в топливную рампу из насоса высокого давления по топливопроводу высокого давления. Из топливной рампы оно распределяется по отдельным форсункам.

Давление топлива измеряется датчиком давления в топливной рампе и, в зависимости от системы, регулируется до требуемой величины клапаном регулирования давления. Иногда, в зависимости от требований к системе, вместо клапана регулирования давления используется клапан сброса давления. Его функцией является ограничение давления в топливной рампе до максимального допустимого значения. Из топливной рампы сжатое до высокого давления топливо поступает в форсунки по трубопроводам высокого давления.

Полость топливной рампы непрерывно заполняется находящимся под давлением топливом. Для достижения аккумуляторного эффекта используется сжимаемость топлива под высоким давлением. Когда топливо выпускается из топливной рампы для впрыска в цилиндры, давление в топливной рампе остается практически неизменным даже при впрыске больших количеств топлива.

Насос-форсунки с клапанным регулированием цикловой подачи

Система насос-форсунок для легковых автомобилей

Система насос-форсунок (UIS) создана для удовлетворения требований, предъявляемых к современным дизельным двигателям с непосредственным впрыском топлива, обладающим высокой удельной мощностью. Система характеризуется компактностью конструкции, высоким давлением впрыска на выходе из форсунки (до 2200 бар) и наличием гидромеханического устройства для предварительного впрыска, осуществляемого по программе на всем рабочем диапазоне, что позволяет значительно снизить шум при сгорании топлива.

Эта система впрыска содержит несколько подсистем (по числу цилиндров двигателя), каждая из которых содержит насос высокого давления, форсунку и электромагнитный клапан (см. рис. 1). Насос-форсунка каждого цилиндра располагается в головке блока цилиндров между клапанами, и носик распылителя входит непосредственно в камеру сгорания двигателя. Насос-форсунки приводятся в действие коромыслами, которые, в свою очередь, приводятся от верхнего распределительного вала, оборудованного дополнительными кулачками. Компактная конструкция при малом объеме отличается высокой гидравлической эффективностью.

Система впрыска заполняется топливом во время хода всасывания плунжера, пока элек-

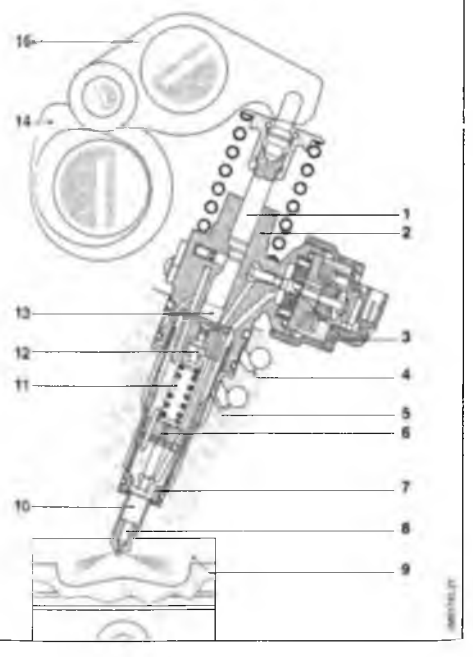


Рис. 1. Конструкция насос-форсунки для легковых автомобилей:
1 – плунжер насос-форсунки,
2 – корпус насос-форсунки,
3 – игла электромагнитного клапана,
4 – возврат топлива (контур низкого давления);
5 – впускной канал (приблизительно 350 отверстий, прожженых лазером, действующих в качестве фильтра);
6 – гидравлический упор (демпфер);
7 – гайка распылителя;
8 – игла распылителя; 9 – камера сгорания двигателя;
10 – распылитель в сборе;
11 – пружина сжатия (пружина распылителя);
12 – плунжер аккумулятора (перепускной плунжер),
13 – камера высокого давления (камера насосного элемента);
14 – распределительный вал,
15 – коромысло с роликом

тромагнитный клапан обесточен и, таким образом, открыт.

Период впрыска топлива начинается, когда наступает момент закрытия электромагнитного клапана (при поступлении на него электрического тока) – это происходит во время хода подачи плунжера насос-форсунки. Предварительный впрыск топлива начинается, когда давление в системе высокого давления достигает уровня открытия распылителя (приблизительно 180 бар), а заканчивается, когда механический клапан (перепускной плунжер)открывается и резко снижает давление в камере высокого давления, обеспечивая закрытие форсунки. Ход и диаметр этого клапана определяют продолжительность так называемого интервала впрыска (между окончанием предварительного впрыска топлива и началом основного). Перемещение поршня перепускного плунжера также воздействует на пружину распылителя, за счет чего быстро отсекается подача топлива в конце предварительного впрыска. Демпфер, расположенный между иглой и пружиной распылителя, позволяет гасить большие пульсации топлива при его подаче. Период времени, когда игла оставляет форсунку открытой, оказывается во время предварительного впрыска очень коротким.

Основной впрыск начинается при дальнейшем движении плунжера насос-форсунки – при достижении определенного давления, обеспечивающего открытие форсунки. Однако, дополнительное предварительное натяжение пружины распылителя под действием открытого перепускного плунжера означает, что теперь это давление (приблизительно 300 бар) значительно выше, чем в начале предварительного впрыска. Впрыск топлива заканчивается, когда электромагнитный клапан обесточивается и, следовательно, открывается.

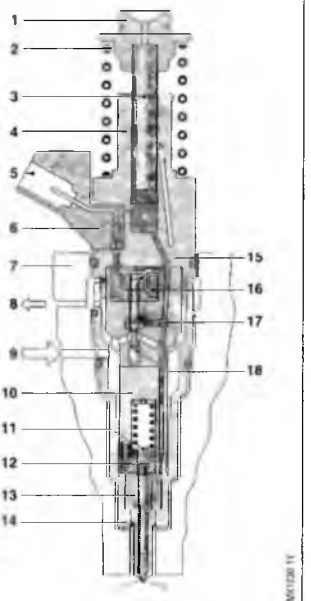
Применение электронного управления позволяет делать выборку из целого ряда хранящихся в памяти ECU запрограммированных значений начала впрыска и количества впрыскиваемого топлива. Эта особенность системы, вместе с высокими давлениями впрыска, дает возможность получить очень высокую удельную мощность двигателя при низких значениях содержания токсичных веществ в отработавших газах и исключительно низком расходе топлива.

Создание в дальнейшем еще более компактной системы с насос-форсунками позволит использовать ее на двигателях с четырьмя клапанами на цилиндр, что даст возможность еще в большей степени снизить эмиссию токсичных веществ с отработавшими газами.

Насос-форсунки для коммерческих автомобилей

Насос-форсунка, управляемая электронным блоком, представляет собой одноцилиндровый модуль впрыска топлива с встроенным насосом высокого давления и распылителем. Насос-форсунки устанавливаются непосредственно в головке блока цилиндров дизель-

Рис. 2. Насос-форсунка для коммерческих автомобилей:
1 – плавающая мембрана; 2 – возвратная пружина; 3 – плунжер насос-форсунки, 4 – корпус насос-форсунки; 5 – разъем; 6 камера высокого давления (камера насосного элемента); 7 – головка блока цилиндров двигателя, 8 – возврат топлива, 9 – подача топлива, 10 – держатель пружины распылителя; 11 – нажимной штифт; 12 – промежуточное кольцо, 13 – распылитель в сборе; 14 – гайка распылителя; 15 – якорь; 16 – обмотка электромагнита, 17 – игла электромагнитного клапана, 18 – пружина электромагнитного клапана



ного двигателя. Кулачок на распределительном валу приводит в действие индивидуальную для каждого цилиндра насос-форсунку непосредственно через коромысло или посредством штанги толкателя и коромысла.

Быстродействующий электромагнитный клапан, в соответствии с параметрами, определяемыми в программной карте двигателя, обеспечивает точную регулировку времени начала впрыска топлива и скорости потока (рис. 2). Значения этих переменных могут быть выбраны из хранящихся в памяти ЭБУ запрограммированных значений. В обесточенном состоянии электромагнитный клапан открыт. В отключенном состоянии электромагнитный клапан обеспечивает неограниченный проход потока топлива от насоса к линии низкого давления системы. Электромагнитный клапан включается во время хода подачи плунжера насос-форсунки, перекрывая перепускной клапан, герметизируя, таким образом, линию высокого давления. Как только превышается давление открытия распылителя, топливо подается к форсунке.

Впрыск топлива заканчивается, когда электромагнитный клапан открывается. Таким образом, момент закрытия клапана определяет начало впрыска, а момент открытия – количество впрыскиваемого топлива.

Компактная конструкция устройства означает, что объем камеры высокого давления очень мал, а гидравлическая жесткость очень велика. Это облегчает достижение высоких давлений впрыска. В зависимости от типа насоса, пиковое давление при полной нагрузке составляет от 1800 до 2200 бар.

Сочетание таких высоких значений давления впрыска и электронного управления процессом впрыска позволяет значительно снизить содержание токсичных веществ в отработавших газах с одновременным сохранением низкого расхода топлива. Система с насос-форсунками удовлетворяет как существующим, так и будущим нормам по предельной токсичности отработавших газов.

Предварительный впрыск топлива (двойная активация электромагнитного клапана) в нижней части диапазонов частоты вращения коленчатого вала и нагрузки двигателя позволяет значительно снизить уровень шума в процессе сгорания топлива и улучшить пуск холодного двигателя.

Кроме того, система позволяет отсекать подачу топлива в отдельные цилиндры двигателя. Например, когда двигатель работает в режиме неполной нагрузки.

Система индивидуальных ТНВД для коммерческих автомобилей

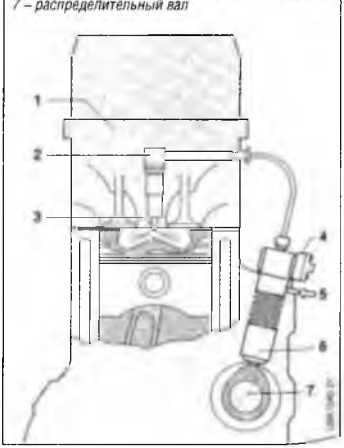
Система индивидуальных ТНВД (UPS), представляющая собой систему управляемых по времени модульных одноцилиндровых насосов высокого давления, тесно связана с системой насос-форсунок. Она применяется только на двигателях коммерческих автомобилей. Подача топлива в каждый цилиндр двигателя осуществляется отдельным модулем, включающим следующие компоненты (см. рис. 3 и 4):

- одноцилиндровый насос высокого давления со встроенным быстродействующим электромагнитным клапаном;
- короткая линия высокого давления;
- корпус форсунки в сборе

Индивидуальный для каждого цилиндра ТНВД устанавливается непосредственно в блок цилиндров дизельного двигателя, где он приводится в движение от распределительного вала через роликовый толкатель.

Метод приведения в действие индивидуального ТНВД при помощи электромагнитного клапана такой же, как для насос-форсунки. В открытом состоянии электромагнитный клапан позволяет плунжеру насоса заполнять ра-

Рис. 3. Индивидуальный ТНВД:
1 – двигатель; 2 – корпус форсунки; 3 – распылитель, 4 – электромагнитный клапан, 5 – подача топлива, 6 – насос высокого давления, 7 – распределительный вал



бочую полость во время такта впуска и впрыскивать топливо в заданное время. Область высокого давления герметизируется только во время такта подачи, когда электромагнит срабатывает на закрытие клапана. Впрыск топлива начинается в тот момент, когда давление перед форсункой станет выше давления начала подъема иглы.

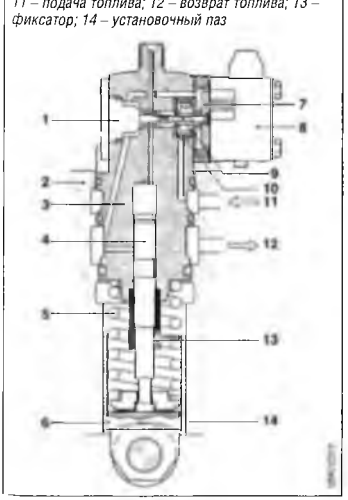
Система индивидуальных ТНВД позволяет достигать давлений впрыска величиной 2100 бар. Такие высокие давления впрыска топлива согласуются с электронным управлением с обратной связью, которое основывается на данных, записанных в памяти ЭБУ, для значительного сокращения расхода топлива и токсичности.

Компоненты

Электронный блок управления (ЭБУ)

Управление электромагнитными клапанами насос-форсунок и индивидуальных ТНВД осуществляется электронным блоком управления (ЭБУ). ЭБУ анализирует все соответствующие параметры состояния, относящиеся как к самому двигателю, так и к окружающей среде, и определяет момент начала впрыска и количество впрыскиваемого топлива для всех условий работы двигателя, что обеспечивает снижение токсичности отработавших газов и экономичную работу двигателя. С целью компенсации разброса значений параметров всей системы начало впрыска топлива также определяется по сигналу BIP (начало периода впрыска). Это означает, что начало впрыска синхронизировано с положением поршня цилиндра двигателя по сигналам инкрементного датчика угла поворота коленчатого вала.

Рис. 4 Индивидуальный ТНВД с электромагнитным клапаном:
1 – ограничитель перемещения иглы клапана, 2 – блок цилиндров, 3 – корпус насоса, 4 – плунжер насоса; 5 – возвратная пружина; 6 – роликовый толкатель; 7 – пластина якоря; 8 – корпус клапана с катушкой и магнитным сердечником; 9 – игла электромагнитного клапана; 10 – фильтр; 11 – подача топлива; 12 – возврат топлива; 13 – фиксатор; 14 – установочный паз



В дополнение к основным функциям управления впрыском топлива электронный блок управления выполняет ряд дополнительных функций, имеющих целью повышение плавности работы двигателя. К этим функциям можно отнести демпфирование пульсаций, регулирование оборотов холостого хода и адаптивное выравнивание работы цилиндров. В целях соблюдения строгих требований к безопасности блок управления автоматически корректирует и компенсирует любые отклонения параметров компонентов системы впрыска от номинальных значений и при необходимости выполняет диагностику системы впрыска топлива и двигателя. Шина CAN (локальная сеть контролеров) может использоваться для сети связи системы с другими компонентами автомобиля, например ABS (антиблокировочной тормозной системой), TCS (системой регулирования тягового усилия) и электронной системой управления автоматической трансмиссией.

Пьезоэлектрическая форсунка

В некоторых системах впрыска топлива последнего поколения форсунка приводится в действие не электромагнитным клапаном, а пьезоэлектрическим исполнительным устройством. По сравнению с форсункой с электромагнитным клапан пьезоэлектрическая форсунка отличается более высоким быстродействием, т.е. игла распылителя быстрее реагирует на активацию клапана. Это имеет большое значение в случае коротких периодов впрыска топлива, имеющих место в системах впрыска топлива высокого давления (см. также «Система впрыска топлива Common Rail»).

Дизельные распределительные топливные насосы высокого давления

Дизельные распределительные топливные насосы высокого давления применяются на 3-, 4-, 5- и 6-цилиндровых дизельных двигателях легковых автомобилей, тягачей, а также легких и средних коммерческих автомобилей. В зависимости от частоты вращения и системы сгорания топлива такие двигатели имеют мощность до 50 кВт на один цилиндр. Насосы распределительного типа для двигателей с непосредственным впрыском обеспечивают давление в форсунке до 1950 бар при частоте вращения коленчатого вала до 4500 мин$^{-1}$.

ТНВД распределительного типа подразделяются на насосы с механическим и электронным управлением, в вариантах с исполнительным устройством в виде поворотного электромагнитного клапана и с электромагнитным клапаном с обратной связью.

В последнее время как на легковых, так и на коммерческих автомобилях на смену распределительным топливным насосам приходят системы впрыска топлива Common Rail.

Аксиально-поршневые распределительные насосы

Конструкция

Топливоподкачивающий насос

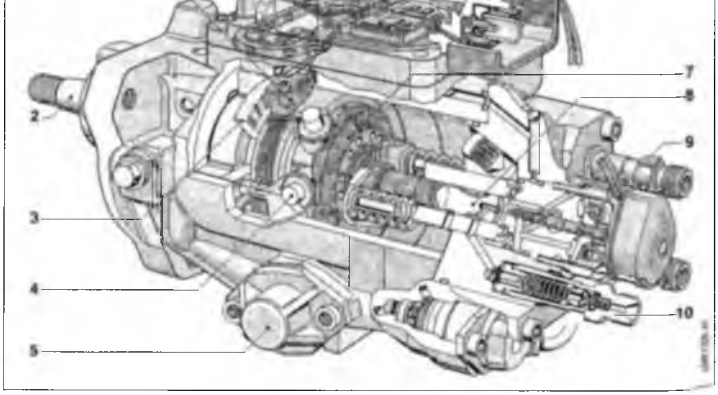
Этот насос лопаточного типа служит для подачи топлива из бака и вместе с нагнетательным регулирующим клапаном создает давление, которое возрастает прямо пропорционально частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Насос высокого давления

Аксиально-поршневой распределительный насос (насос типа VE) включает только один насосный элемент для всех цилиндров. Плунжер-распределитель насоса во время своего рабочего хода вытесняет топливо и, одновременно поворачиваясь, распределяет топливо по отдельным выпускным каналам (см. рис. 1).

Во время одного оборота ведущего вала насоса плунжер совершает количество ра-

Рис. 1. Аксиально-поршневой распределительный топливный насос высокого давления с управлением при помощи электромагнитного клапана:
1 – датчик угла поворота, 2 – приводной вал; 3 – опорное кольцо лопастного топливоподкачивающего насоса; 4 – роликовое кольцо; 5 – устройстов опережения впрыска; 6 – блок управления насосом; 7 – кулачковая шайба; 8 – плунжер-распределитель, 9 – электромагнитный клапан высокого давления, 10 – нагнетательный клапан



бочих ходов, равное числу цилиндров двигателя. Приводной вал вращает кулачковую шайбу и плунжер, с которым она соединена. Выступы на кулачковой шайбе обеспечивают осевое перемещение плунжера и его вращение – распределение и подачу топлива.

Насос продолжает подачу топлива во время рабочего хода до тех пор, пока перепускное отверстие плунжера остается закрытым, Подача топлива прекращается, когда перепускное отверстие открывается регулирующей втулкой (см. рис. 2).

Электронная система управления распределительным топливным насосом с поворотным электромагнитным исполнительным механизмом

В отличие от насоса типа VE, имеющего механическую систему управления, распределительный топливный насос с поворотным электромагнитным исполнительным механизмом имеет электронный регулятор и устройство опережения впрыска с электронным управлением (см. рис. 2 и «Электронная система управления дизельным двигателем» (EDC)).

Электронный регулятор

Эксцентрично установленная шаровая цапфа связывает регулирующую втулку насоса типа VE и электромагнитный исполнительный механизм. Угловая установка исполнительного механизма определяет положение регулирующей втулки и с ее помощью активный рабочий ход плунжера-распределителя насоса. К исполнительному механизму подсоединяется измерительный датчик положения (потенциометр или индуктивный измерительный преобразователь).

ЭБУ получает сигналы от различных датчиков: положения педали подачи топлива, частоты вращения коленчатого вала двигателя, температуры воздуха, охлаждающей жидкости и топлива, давления всасываемого воздуха, атмосферного давления и т. п. Он использует эти входные величины, хранящиеся в его памяти, для определения правильного количества впрыскиваемого топлива. Таким образом, блок управления изменяет ток возбуждения исполнительного привода до тех пор, пока не совпадут требуемые по исходным данным реальные величины для принятого положения рейки.

Электронно-управляемое устройство угла опережения впрыска

Гидравлическое устройство опережения впрыска с электромагнитным клапаном поворачивает роликовое кольцо в зависимости от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала двигателя таким образом, что по отношению к положению поршня цилиндра подача топлива может начинаться с опережением или запаздыванием.

Рис. 2. Электронная система управления аксиально-поршневым распределительным топливным насосом высокого давления

1 – топливоподкачивающий насос; 2 – электромагнитный клапан устройства опережения впрыска; 3 – муфта опережения впрыска; 4 – регулирующая втулка; 5 – поворотный электромагнитный исполнительный механизм с измерительным датчиком положения; 6 – электронный блок управления; 7 – роликовое кольцо (повернуто на 90°).

Входные и выходные переменные:

a – частота вращения коленчатого вала; b – момент начала впрыска; c – температура; d – давление всасываемого воздуха; e – положение педали подачи топлива; f – возврат топлива, g – линия высокого давления к распылителю



При этом сигнал от датчика, с помощью которого определяется момент открытия распылителя, сравнивается с запрограммированной уставкой. Электромагнитный клапан устройства опережения впрыска изменяет давление, прилагаемое к плунжеру, и с его помощью установку регулирования устройства опережения угла впрыскивания. Тактовая частота, используемая для срабатывания электромагнита, модифицируется, пока не совпадут действительная и исходная величины.

Электронная система управления распределительными топливными насосами с дозирующим электромагнитным клапаном

При использовании таких насосов (рис 1) количество подаваемого топлива дозируется электромагнитным клапаном высокого давления, который перекрывает камеру насосного элемента. Это дает еще большую гибкость дозирования топлива и возможность регулирования момента начала впрыска топлива. Кроме того, за счет уменьшения нерабочих объемов повышается потенциал рабочего давления насоса.

Основными узлами насоса являются электромагнитный клапан высокого давления, электронный блок управления и инкрементный датчик угла поворота для управления электромагнитным клапаном.

Закрытие электромагнитного клапана определяет начало подачи топлива, которая продолжается до момента открытия клапана. Количество впрыскиваемого топлива зависит от времени, в течение которого клапан остается закрытым. Управление при помощи электромагнитного клапана позволяет быстро открывать и закрывать камеру насосного элемента независимо от частоты вращения коленчатого вала. Такой метод обеспечивает быстрое регулирование подачи топлива независимо от частоты вращения коленчатого вала двигателя, улучшение герметизации полостей высокого давления и в конечном итоге увеличение эффективности насоса.

Насос снабжен собственным блоком управления для точной установки момента начала подачи топлива и его дозирования. В памяти ЭБУ хранится программа работы конкретного насоса и информация о данных его калибровки.

Электронный блок управления работой двигателя определяет начало впрыска топлива и его подачу на основе рабочих характеристик двигателя и отправляет эту информацию по каналу связи в блок управления насоса. С использованием такой системы можно управлять как моментом начала впрыска, так и началом нагнетания.

Блок управления насоса также получает сигнал о количестве впрыскиваемого топлива через шину данных. Этот сигнал затем обрабатывается в блок управления двигателя в соответствии с сигналами, поступающими от педали подачи топлива, и другими параметрами, определяющими потребное количество топлива. В блок управления насоса сигналы о количестве впрыскиваемого топлива и скоростном режиме работы насоса на момент начала подачи топлива принимаются в качестве входных переменных для диаграммы рабочих характеристик насоса, на основании которых соответствующий период срабатывания сохраняется в виде угла поворота кулачковой шайбы.

И наконец, момент срабатывания электромагнитного клапана высокого давления и продолжительность его закрытия определяются по данным угла поворота датчика, интегрированного в топливный насос распределительного типа (VE). Этот датчик используется для регулирования по углу поворота/времени. Датчик состоит из магниторезистивного сенсора и кольцевого элемента, обладающего магнитным сопротивлением и имеющего метки, расставленные через 3°, для каждого цилиндра двигателя. Датчик с высокой точностью определяет угол поворота приводного вала, при котором электромагнитный клапан открывается и закрывается. Это позволяет блок управления насоса преобразовывать данные по моменту начала подачи топлива в данные по соответствующему этому моменту углу поворота кулачкового вала и наоборот.

Мягкое протекание процесса подачи топлива в начале впрыскивания, которое зависит от конструктивных особенностей насоса распределительного типа, еще больше реализуется при использовании форсунки с двумя пружинами. При работе прогретого двигателя с турбонаддувом такое протекание топливоподачи позволяет снизить уровень шума работающего двигателя.

Предварительный впрыск

Обеспечивает дальнейшее снижение шума от сгорания топлива без ухудшения работоспособности всей системы, которая должна обеспечивать максимальную эффективную мощность при минимально возможном эксплуатационном расходе топлива. Для получения предварительного впрыска дополнительных конструктивных изменений не требуется. В течение нескольких миллисекунд ЭБУ заставляет срабатывать электромагнитный клапан дважды. Электромагнитный клапан с

высокой точностью и быстродействием регулирует количество впрыскиваемого топлива. Типичные значения количества впрыскиваемого топлива составляют 1,5 мм^3.

Радиально-поршневые распределительные насосы

Конструкция

Насос высокого давления

Радиально-поршневой распределительный насос (насос типа VR, см. рис. 3) приводится в действие непосредственно от приводного вала. Насос включает кулачковую шайбу, башмаки роликов и ролики, подающий плунжер, ведущий диск и насосную секцию (головку) вала-распределителя.

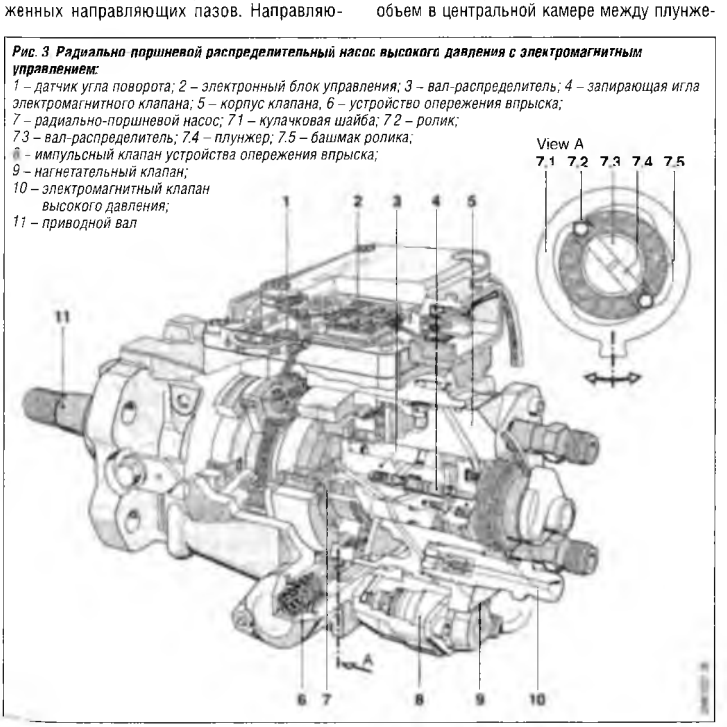
Приводной вал приводит во вращение ведущий диск при помощи радиально расположенных направляющих пазов. Направляющие пазы одновременно служат в качестве установочных пазов для башмаков роликов. Башмаки роликов и удерживаемые ими ролики обегают внутренний профиль кулачковой шайбы. Число кулачков соответствует числу цилиндров двигателя.

Ведущий диск приводит во вращение вал-распределитель. Головка вала-распределителя удерживает подающие плунжеры, расположенные радиально по отношению к оси приводного вала (отсюда наименование «радиально-поршневой распределительный насос»).

Плунжеры прилегают к башмакам роликов. Когда башмаки роликов смещаются наружу под действием центробежных сил, плунжеры, следуя профилю кулачковой шайбы, совершают возвратно-поступательное движение. Когда плунжеры выталкиваются кулачками, объем в центральной камере между плунже-

Рис. 3 Радиально-поршневой распределительный насос высокого давления с электромагнитным управлением:

1 – датчик угла поворота; 2 – электронный блок управления; 3 – вал-распределитель; 4 – запирающая игла электромагнитного клапана; 5 – корпус клапана, 6 – устройство опережения впрыска; 7 – радиально-поршневой насос; 7.1 – кулачковая шайба; 7.2 – ролик; 7.3 – вал-распределитель; 7.4 – плунжер; 7.5 – башмак ролика; 8 – импульсный клапан устройства опережения впрыска; 9 – нагнетательный клапан; 10 – электромагнитный клапан высокого давления; 11 – приводной вал



рами уменьшается. При закрытом электромагнитном клапане высокого давления это приводит к сжатию топлива. В определенные моменты времени топливо направляется по каналам в вале-распределителе к соответствующим выпускным клапанам.

Так как кулачковый механизм имеет непосредственный привод, отклонения от заданных законов подачи топлива минимальны. Топливо распределяется, по меньшей мере, двумя радиально установленными плунжерами. Характерные для этого типа насоса небольшие нагрузки позволяют использовать кулачки с профилем кривизны. Повышение количества подаваемого насосом топлива может быть достигнуто за счет увеличения числа плунжеров.

На радиально-поршневых распределительных насосах давления в камере насосного элемента достигает 1100 бар, а давления в распределителе – 1950 бар.

Электронная система управления

Электромагнитный клапан высокого давления

Электромагнитный клапан высокого давления открывается и закрывается в соответствии с сигналами блока управления насосом. Продолжительность закрытого положения клапана определяет период подачи топлива насосом высокого давления. Это означает, что дозирование топлива, подаваемого в каждый отдельный цилиндр, может осуществляться с очень высокой точностью.

Управление электромагнитным клапаном высокого давления осуществляется посредством регулирования тока. По величине тока блок управления насосом определяет контакт иглы клапана с седлом. Это позволяет с высокой точностью вычислять моменты начала подачи топлива и начала впрыска топлива.

Устройство опережения впрыска

Гидравлическое устройство опережения впрыска поворачивает кулачковую шайбу таким образом, что начало подачи топлива может быть сдвинуто относительно положения поршня двигателя в сторону опережения или запаздывания. Таким образом, взаимодействие между электромагнитным клапаном высокого давления и устройством опережения впрыска изменяет момент начала впрыска топлива и процесс впрыска в соответствии с условиями работы двигателя.

Это гидравлическое устройство опережения впрыска может развивать более высокие усилия смещения по сравнению с устройством опережения впрыска аксиально-поршневого распределительного насоса.

Язычок кулачковой шайбы входит в паз плунжера регулятора таким образом, что осевое перемещение плунжера вызывает поворот кулачковой шайбы. По центру плунжера регулятора установлена управляющая втулка, которая открывает или закрывает отверстия в управляющем плунжере. Соосно с плунжером регулятора установлен подпружиненный управляющий плунжер, определяющий требуемое положение управляющей втулки. Управляемый блоком управления насоса электромагнитный клапан модулирует давление, воздействующее на управляющий плунжер.

Электромагнитный клапан устройства опережения впрыска действует как регулируемый дроссель. Он может непрерывно регулировать управляющее давление. При этом управляющий плунжер может принимать любое положение в пределах от максимального опережения начала подачи топлива до максимального запаздывания.

Вариант топливного насоса с электронной системой управления

К последнему поколению насосов распределительного типа относятся малогабаритные системы автономного действия, в которые входит электронный блок управления, управляющий также работой двигателя. Так как при этом отпадает необходимость в использовании для управления работой двигателя отдельного блока управления, система впрыска топлива не требует большого числа соединительных разъемов и сложной электропроводки, что упрощает процесс монтажа.

Двигатель вместе с системой впрыска может быть установлен и испытан как единая система, независимо от того, на каком типе автомобиля он размещен.

Система впрыска топлива

Топливный насос высокого давления является частью системы впрыска топлива (см. рис. 4). Система впрыска дизельного топлива включает систему подачи топлива (ступень низкого давления), компоненты высокого давления, компоненты впрыска топлива и систему управления. Система подачи топлива осуществляет аккумулирование и фильтрацию топлива. При необходимости может быть установлен дополнительный

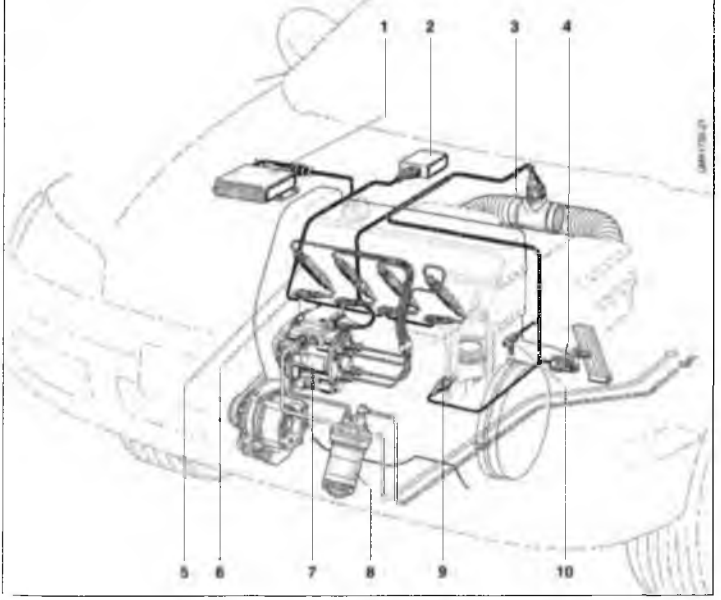
топливный насос. Ступень высокого давления включает топливный насос и топливопроводы высокого давления. Ступень высокого давления создает в системе высокое давление и распределяет топливо по цилиндрам двигателя.

В системах впрыска топлива с распределительными насосами компонентами, непосредственно осуществляющими впрыск топлива, являются впрыскивающие форсунки и их корпусы, которые отличаются большим разнообразием типов. На каждом цилиндре устанавливается по одному корпусу форсунки. Корпусы форсунок крепятся в головке блока цилиндров. Функция форсунок заключается в точном дозировании топлива и формировании струи топлива требуемой формы, а также уплотнении камеры сгорания. Каждая форсунка состоит из корпуса распылителя с несколькими отверстиями (диаметром до 0,12 мм) и иглы. Игла перемещается в направляющем отверстии в корпусе распылителя форсунки, обеспечивая правильное положение отверстий (оси которых находятся под различными углами к корпусу распылителя форсунки) и камеры сгорания двигателя.

Механическая или электронная система управления распределительным топливным насосом высокого давления устанавливается на самом насосе. Некоторые системы включают отдельный блок управления двигателем. Версии насосов с электронной системой управления включают различные датчики и генераторы управляющих сигналов.

Рис. 4 Система впрыска дизельного топлива с радиально-поршневым топливным насосом высокого давления с электромагнитным управлением:

1 – блок управления двигателем; 2 – блок управления работой свечей накаливания; 3 – датчик массового расхода воздуха; 4 – датчик положения педали подачи топлива; 5 – форсунки; 6 – свечи накаливания; 7 – распределительный топливный насос высокого давления с блоком управления; 8 – топливный фильтр; 9 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 10 – датчик частоты вращения коленчатого вала



Вспомогательные пусковые устройства

Дизельные двигатели с горячими предкамерами и вихрекамерами и с системами прямого впрыска топлива самопроизвольно запускаются при температурах наружного воздуха □ 0 °C. Здесь температура самопроизвольного воспламенения дизельного топлива, составляющая 250 °C, достигается при скорости вращения коленчатого вала, обеспечиваемой стартером. Для запуска дизельных двигателей с холодными предкамерами и вихрекамерами при температурах наружного воздуха < 40 °C или < 20 °C и для двигателей с прямым впрыском топлива при температуре ниже 0 °C требуется применение вспомогательных пусковых устройств.

Системы предпускового подогрева

Системы предпускового подогрева устанавливаются как на легковых, так и на коммерческих автомобилях.

Системы предпускового подогрева в основном состоят из свечей накаливания с нагревательным элементом в оболочке (GLP), блока управления и программного обеспечения в системе управления двигателем. В обычных системах предпускового подогрева используются свечи накаливания с номинальным напряжением 11 В, на которые подается питание от электрической системы автомобиля. В новых низковольтных системах предпускового подогрева используются свечи накаливания с номинальным напряжением менее 11 В, теплопроизводительность которых адаптируется к двигателю электронным блоком управления свечами накаливания.

На дизельных двигателях с предкамерой и вихрекамерой (IDI) свеча накаливания вставлена во вторичную камеру сгорания, в то время как на двигателях с прямым впрыском топлива она вставлена в главную камеру сгорания цилиндра двигателя.

Проходя мимо наконечника свечи накаливания, топливовоздушная смесь нагревается. Температура воспламенения достигается за счет совместного действия свечей накаливания и нагрева всасываемого воздуха во время такта сжатия.

На дизельных двигателях с рабочим объемом более 1 л/цилиндр (коммерческие автомобили) вместо систем предпускового подогрева обычно используются пламенные подогреватели.

Фазы предпускового подогрева

- Предварительный нагрев: свечи накаливания нагреваются до рабочей температуры.
- Прогрев двигателя: для пуска двигателя система предпускового подогрева поддерживает требуемую температуру свечей накаливания в течение определенного периода времени.
- Вспомогательный нагрев: работа свечей накаливания во время прогрева двигателя.
- Фаза послепускового нагрева: начинается после выключения стартера.
- Промежуточный нагрев: после охлаждения двигателя во время движения накатом или во время регенерации сажевого фильтра.

Обычная система предпускового подогрева

Обычная система предпускового подогрева включает свечи накаливания с номинальным напряжением 11 В, релейный блок управления и модуль управления предпусковым подогревом, встроенный в блок управления двигателем.

Программа предпускового подогрева в EDC (электронная система управления дизельным двигателем) включает и выключает свечи накаливания в соответствии с положением выключателя предпускового подогрева и параметрами, хранящимися в памяти блока управления. Блок управления свечами накаливания через реле подает на свечи накаливания напряжение бортовой электрической системы автомобиля во время фаз предварительного нагрева, прогрева, пуска двигателя и послепускового нагрева. Номинальное напряжение свечи накаливания с нагревательным элементом в оболочке составляет 11 В. Ее теплопроизводительность зависит от напряжения питания и сопротивления свечи, которое, в свою очередь, зависит от температуры (свеча имеет положительный температурный коэффициент). Таким образом, свеча накаливания обладает свойством саморегулирования. В сочетании с функцией зависимого от нагрузки

Рис. 1. Свеча накаливания GLP2 с нагревательным элементом в оболочке:
1 – наконечник; 2 – изолирующая прокладка; 3 – двойное уплотнение; 4 – стержень; 5 – корпус; 6 – уплотнение защитной оболочки, 7 – нагревательная спираль; 8 – оболочка; 9 – порошок



двигателя отключения, заложенной в программу, это позволяет предотвратить тепловую перегрузку свечей накаливания.

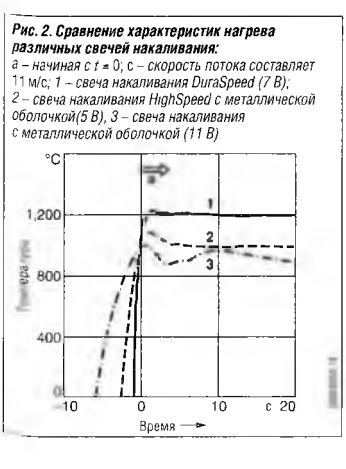
Свеча накаливания Duraterm с нагревательным элементом в оболочке

Конструкция и характеристики свечей накаливания:

Основной частью свечи накаливания с нагревательным элементом в оболочке является электронагревательный элемент (см. рис. 1). Трубчатый нагревательный элемент состоит из жаро- и коррозионностойкой оболочки, в которой заключена нить накаливания, окруженная спрессованным порошковым оксидом магния. Эта нить состоит из двух последовательно соединенных резисторов – нагревательной нити, заключенной в наконечнике оболочки, и регулирующей нити.

В то время как электрическое сопротивление нагревательной нити не зависит от температуры, регулирующая нить имеет положительный температурный коэффициент сопротивления. В свечах накаливания последнего поколения (типа GLP2) зависимость сопротивления от температуры еще более крутая, чем в свечах старой конструкции (типа S-RSK). Поэтому свечи накаливания типа GLP2 быстрее достигают температуры, требуемой для воспламенения дизельного топлива (850 °C за 4 секунды), а также имеют более низкую температуру в установившемся состоянии (см. рис. 2). Это означает, что температура поддерживается ниже критического для свечи накаливания уровня.

Рис. 2. Сравнение характеристик нагрева различных свечей накаливания:
а – начиная с t = 0; с – скорость потока составляет 11 м/с; 1 – свеча накаливания DuraSpeed (7 В); 2 – свеча накаливания HighSpeed с металлической оболочкой(5 В), 3 – свеча накаливания с металлической оболочкой (11 В)



Эти свечи накаливания могут продолжать работать до трех минут после запуска двигателя. Эта функция послепускового нагрева обеспечивает более эффективный прогрев холодного двигателя со значительно меньшим уровнем шума и количеством выбросов.

Нагревательная нить вварена в колпачок оболочки для заземления. Регулирующая нить присоединена к выводной шпильке для подключения к электрической системе автомобиля.

Описание процесса:

При подаче напряжения на свечу накаливания основная часть электроэнергии первоначально преобразуется в тепло; температура наконечника свечи накаливания резко возрастает. Температура регулирующей нити, а также ее сопротивление возрастают с определенной временной задержкой. Потребляемый свечой накаливания ток, следовательно, ее теплопроизводительность снижаются, и температура приближается к температуре стабильного состояния.

Низковольтная система предпускового подогрева

Низковольтная система предпускового подогрева содержит:

- низковольтные свечи накаливания DuraSpeed с керамической оболочкой или HighSpeed с металлической оболочкой. Номинальное напряжение этих свечей накаливания составляет менее 11 В;
- электронный блок управления свечами накаливания;
- программный модуль управления функцией нагрева, встроенный в блок управления двигателем.

В целях как можно более быстрого достижения температуры, требуемой для пуска двигателя, на свечи накаливания перед пуском кратковременно подается повышенное напряжение. Затем, в начале фазы прогрева напряжение снижается до номинального значения.

Во время пуска напряжение снова повышается с целью компенсации охлаждения свечей накаливания холодным всасываемым воздухом. Это также возможно на стадиях послепускового и промежуточного нагрева. Значение требуемого напряжения берется из таблицы характеристик, адаптированной к каждому двигателю. Таблица характеристик содержит такие параметры, как частота вращения коленчатого вала, количество впрыскиваемого топлива, время после выключения стартера и температура охлаждающей жидкости.

Такое программное управление свечами накаливания позволяет предотвратить их тепловую перегрузку при любых условиях работы двигателя. В систему EDC также заложена функция защиты свечей накаливания от перегрева при повторных включениях.

Эти системы предпускового подогрева обеспечивают быстрый пуск двигателя при использовании свечей накаливания типа HighSpeed с металлической оболочкой и немедленный пуск при использовании свечей накаливания типа DuraSpeed при температурах наружного воздуха до –28 °С.

Свеча накаливания типа HighSpeed с металлической оболочкой

Конструкция и принцип действия свечи накаливания HighSpeed в основном аналогичны свече накаливания типа Duraterm. Нагревательная и регулирующая нити рассчитаны на более низкое номинальное напряжение и обеспечивают высокую скорость нагрева.

Тонкий корпус позволяет устанавливать свечи в ограниченном пространстве на двигателях с четырьмя клапанами на один цилиндр. Нагревательный элемент (диаметр 4/3,3 мм) имеет коническую переднюю часть, что позволяет разместить нить накаливания ближе к оболочке. Это позволяет в форсированном режиме достигать скорости нагрева до 1000 °С/3 с. Максимальная температура нагрева составляет свыше 1000 °С. Температура во время пуска и прогрева двигателя составляет приблизительно 980 °С. Эти функциональные характеристики адаптированы к двигателям со степенью сжатия ε □ 18.

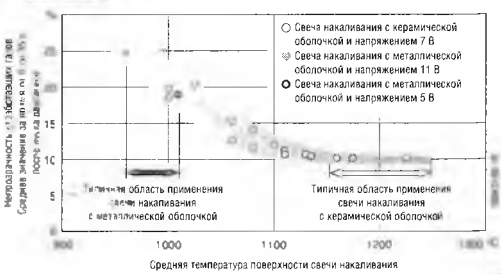
Свеча накаливания DuraSpeed с керамической оболочкой

Свечи накаливания DuraSpeed с керамической оболочкой изготовлены из керамического материала, имеющего очень высокую температурную стойкость. Благодаря своей очень высокой стойкости к окислению и тепловым ударам они позволяют производить немедленный пуск двигателя, а также послепусковой и промежуточный нагрев продолжительностью несколько минут при температуре 1300 °С. Номинальное напряжение свечей накаливания DuraSpeed составляет 7 В.

Снижение токсичности выбросов дизельных двигателей за счет уменьшения степени сжатия

За счет уменьшения степени сжатия на современных дизельных двигателях с ε = 18 до ε = 16. можно снизить количество выбросов NO_x и сажи, в то же время повышая удельную мощность двигателя. Однако на таких двигателях пуск холодного двигателя и работа непрогретого двигателя представляют определенные проблемы. Для обеспечения минимальной дымности выхлопа, уверенного пуска холодного двигателя и ровной работы двигателя во время прогрева требуется температура свечей накаливания свыше 1150 °С, в то время как для обычных двигателей достаточно температуры 850 °С. Во время пуска холодного двигателя умеренное количество выбросов и нормальную дымность выхлопа можно обеспечить только посредством послепусковой работы свечей накаливания в течение нескольких минут. По сравнению со стандартными системами предпускового подогрева применение керамических свечей накаливания фирмы Bosch позволяет снизить дымность выхлопа до 60 % (см. рис. 3).

Рис. 3. Влияние температуры поверхности свечей накаливания с керамической оболочкой на дымность выхлопа (при оптимальной установке свечей накаливания). Работа на холостом ходу холодного четырехцилиндрового двигателя с системой впрыска топлива с общей топливной магистралью и степенью сжатия 16:1 при температуре наружного воздуха -20 °С



Очистка отработавших газов

Каталитические нейтрализаторы

В дизельных двигателях, работающих с избытком воздуха, трехкомпонентный каталитический нейтрализатор может быть использован для снижения содержания в отработавших газах не только оксидов азота (NO_x). Это обусловлено тем, что углеводороды и оксид углерода (HC и CO), содержащиеся в бедных отработавших газах в каталитическом нейтрализаторе предпочитают вступать в реакцию не с оксидами азота, а с содержащимся в отработавших газах кислороде.

HC и CO можно относительно легко удалить из выбросов дизельного двигателя при помощи каталитического нейтрализатора окислительного типа. Удаление оксидов азота в присутствии кислорода является более сложным процессом; в принципе удалить оксиды азота можно при помощи каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа или каталитического нейтрализатора типа SCR (селективного каталитического восстановления).

Каталитический нейтрализатор окислительного типа

Дизельный каталитический нейтрализатор окислительного типа (DOC) состоит в основном из керамической подложки, смеси оксидов, включающей оксид алюминия (Al_2O_3), оксид церия (IV) (CeO_2), оксид циркония (ZrO_2) и активные благородные каталитические металлы, такие как платина (Pt), палладий (Pd) и родий (Rh).

Каталитический нейтрализатор окислительного типа выполняет ряд функций:

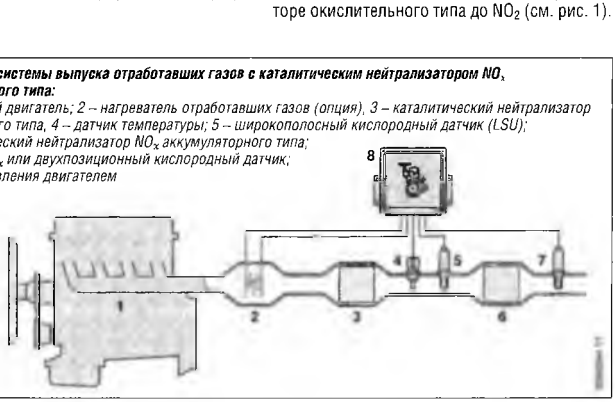
- CO и HC окисляются в каталитическом нейтрализаторе с образованием CO_2 и H_2O. При этом, начиная с определенной температуры (170–200 °C), имеет место практически полное окисление;
- твердые частицы частично состоят из углеводородов, которые десорбируют из структуры с повышением температуры. Окисление этих углеводородов в каталитическом нейтрализаторе окислительного типа снижает массу частиц;
- окисление NO до NO_2; Высокое содержание NO_2 в NO_x имеет большое значение для нормальной работы нескольких последующих компонентов (сажевого фильтра, каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа, каталитического нейтрализатора типа SCR);
- каталитический нейтрализатор окислительного типа может использоваться в качестве каталитической камеры сгорания для повышения температуры отработавших газов (например, для регенерации сажевого фильтра).

Каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа

Поскольку каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа (NSC) способен накапливать только NO_2, но не NO, сначала NO окисляется в каталитическом нейтрализаторе окислительного типа до NO_2 (см. рис. 1).

Рис. 1. Схема системы выпуска отработавших газов с каталитическим нейтрализатором NO_x аккумуляторного типа:

1 – дизельный двигатель; 2 – нагреватель отработавших газов (опция), 3 – каталитический нейтрализатор окислительного типа, 4 – датчик температуры; 5 – широкополосный кислородный датчик (LSU); 6 – каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа; 7 – датчик NO_x или двухпозиционный кислородный датчик; 8 – блок управления двигателем



Аккумулирование NO_x

Аккумулирование диоксида азота NO_2 осуществляется за счет ее реакции с соединениями каталитического нейтрализатора (например, в качестве аккумулирующего материала может использоваться карбонат бария $BaCO_3$) и кислородом (O_2), содержащимся в бедных отработавших газах с образованием нитратов.

Процесс аккумулирования протекает оптимальным образом при температуре отработавших газов 250–450 °C (в зависимости от материала); при более низких температурах окисление NO до NO_2 протекает очень медленно, а при более высоких – NO_2 нестабильна.

В зависимости от рабочего режима двигателя процесс аккумулирования занимает от 30 до 300 секунд.

Удаление и преобразование NO_x

По окончании фазы аккумулирования каталитический нейтрализатор должен быть регенерирован. Для регенерации необходимо обеспечить обогащение отработавших газов ($\lambda < 1$). Отработавшие газы содержат столь большое количество восстановителей (CO, H_2 и различные углеводороды), что нитраты быстро растворяются, и освобожденный NO_2 восстанавливается до N_2 в каталитическом нейтрализаторе окислительного типа.

Процесс регенерации занимает от 2 до 10 секунд.

Десульфатация

Одной из проблем в работе каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа является его чувствительность к сере. SO_2 удаляется из отработавших газов даже более эффективно, чем NO_x, и накапливается в каталитическом нейтрализаторе. Во время нормальной регенерации сульфаты не растворяются. Это означает, что количество накопленного SO_2 непрерывно увеличивается. Это приводит к снижению способности нейтрализатора к накоплению и преобразованию NO_x. Для обеспечения надлежащей способности нейтрализатора к накоплению NO_x необходимо регулярно выполнять десульфатацию (регенерацию серы).

Во время процесс десульфатации каталитический нейтрализатор нагревается до температуры свыше 650 °C на время более пяти минут и продувается богатыми отработавшими газами ($\lambda < 1$). Система управления двигателем стремится к достижению полного извлечения O_2 из отработавших газов. При этих условиях соединения серы снова растворяются.

Выбор подходящего алгоритма управления процессом десульфатации (например, колебания λ вокруг значения $\lambda = 1$) должен исключить восстановление удаленного SO_2 до сульфида водорода (H_2S) в результате постоянного дефицита кислорода в отработавших газах.

Селективное каталитическое восстановление оксидов азота

Процесс селективного каталитического восстановления оксидов азота (SCR) основан на том, что определенные восстановители селективно снижают содержание (NO_x) в присутствии кислорода. Здесь слово «селективно» означает, что восстановитель предпочитает вступать в реакцию с кислородом, содержащимся в оксидах азота, а не с молекулярным кислородом, в большом количестве присутствующем в отработавших газах. В данном случае высокой селективностью обладает такой восстановитель как аммиак (NH_3).

Поскольку аммиак является токсичным веществом, на автомобилях реагент-восстановитель получается из нетоксичной мочевины $(NH_2)_2CO$. Мочевина хорошо растворяется в воде и, следовательно, может добавляться к отработавшим газам в виде водного раствора мочевины. Водный раствор мочевины предлагается на рынке под брендом AdBlue.

При массовой концентрации мочевины в воде 32,5 % температура замерзания раствора составляет около –11 °C. При этом образуется эвтектический раствор, компоненты которого при замерзании не сепарируются.

Химические реакции

Перед началом реакции SCR из мочевины образуется аммиак. Этот процесс происходит в две стадии, известные под названием гидролиза. Сначала в ходе термического расщепления (термолиза) образуются NH_3 и изоциановая кислота:

$$(NH_2)_2CO \rightarrow NH_3 + HNCO \text{ (термолиз)}.$$

Затем изоциановая кислота вступает в реакцию с водой с образованием аммиака и диоксида углерода:

$$HNCO + H_2O \rightarrow NH_3 + CO_2 \text{ (гидролиз)}.$$

Во избежание выпадения твердого осадка, вторая реакция должна протекать быстро, что обеспечивается выбором подходящих катализаторов и обеспечением достаточно высоких

температур (начиная с 250 °С). Современные реакторы SCR одновременно выполняют функции каталитического нейтрализатора.

Аммиак образуется в результате следующих, протекающих в каталитическом нейтрализаторе SCR реакций термогидролиза:

$4\,NO + 4\,NH_3 + O_2 \rightarrow 4\,N_2 + 6\,H_2O$ (уравнение 1);
$NO + NO_2 + 2\,NH_3 \rightarrow 2\,N_2 + 3\,H_2O$ (уравнение 2);
$6\,NO_2 + 8\,NH_3 \rightarrow 7\,N_2 + 12\,H_2O$ (уравнение 3).

При низких температурах (ниже 300 °С) преобразование в основном протекает в соответствии с реакций, описываемой уравнением 2. Отсюда следует, что для нормального протекания реакции при низких температурах требуется соотношение NO_2 / NO приблизительно 1 : 1. При таких условиях эта реакция может протекать при температурах от 170 до 200 °С.

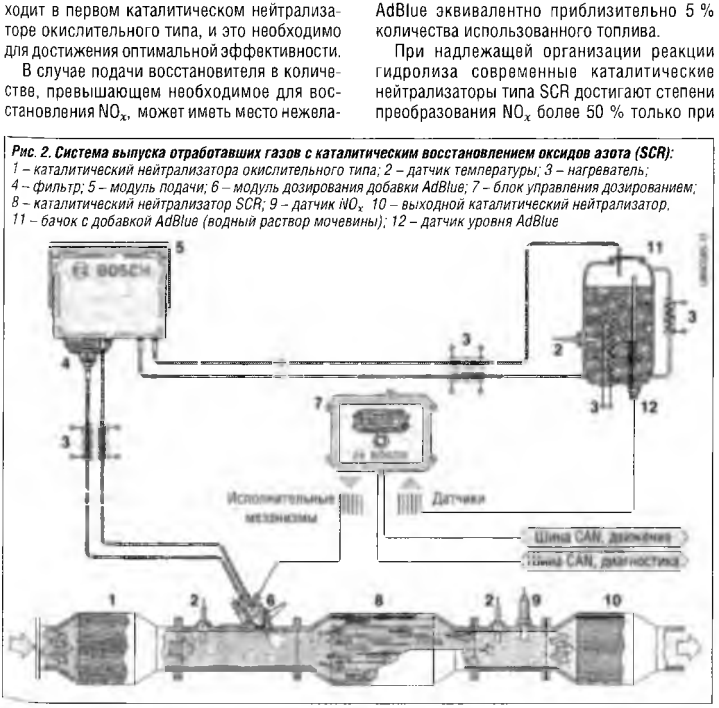
Окисление NO с образованием NO_x происходит в первом каталитическом нейтрализаторе окислительного типа, и это необходимо для достижения оптимальной эффективности.

В случае подачи восстановителя в количестве, превышающем необходимое для восстановления NO_x, может иметь место нежелательный выброс NH_3. NH_3 можно удалить путем установки дополнительного каталитического нейтрализатора окислительного типа после нейтрализатора SCR. Этот блокирующий каталитический нейтрализатор окисляет аммиак с образованием N_2 и H_2O. Кроме того, важным условием является точное дозирование AdBlue.

Важным параметром является коэффициент подачи α, который определяется как молярное отношение дозируемого NH_3 к количеству NO_x, присутствующих в отработавших газах. При идеальных условиях (отсутствие выбросов NH_3, отсутствие вторичных реакций, отсутствие окисления NH_3) α прямо пропорционален степени восстановления NO_x. При α = 1 теоретически достижимо 100 % восстановление NO_x. Практическими достижимыми значениями являются 90 % восстановление NH_3 и концентрация NO_x в значении 20 частей/млн. Требуемое для этого количество добавки AdBlue эквивалентно приблизительно 5 % количества использованного топлива.

При надлежащей организации реакции гидролиза современные каталитические нейтрализаторы типа SCR достигают степени преобразования NO_x более 50 % только при

Рис. 2. Система выпуска отработавших газов с каталитическим восстановлением оксидов азота (SCR):
1 – каталитический нейтрализатора окислительного типа; 2 – датчик температуры; 3 – нагреватель; 4 – фильтр; 5 – модуль подачи; 6 – модуль дозирования добавки AdBlue; 7 – блок управления дозированием; 8 – каталитический нейтрализатор SCR; 9 – датчик NO_x 10 – выходной каталитический нейтрализатор, 11 – бачок с добавкой AdBlue (водный раствор мочевины); 12 – датчик уровня AdBlue



температурах более 250 °С. Оптимизированная степень преобразования достигается при температурах от 250 до 450 °С.

Система SCR

Модульная система SCR (см. рис. 2) осуществляет дозирование реагента-восстановителя. Модуль подачи осуществляет подачу водного раствора мочевины под требуемым давлением в модуль дозирования при помощи диафрагменного насоса. Модуль дозирования осуществляет точное дозирование раствора и его распыление в системе выпуска отработавших газов. Основной функцией блока управления (функционально представляющего собой отдельный модуль управления дозированием, встроенный в блок управления двигателем) является вычисление требуемого количества добавки на основе моделей в соответствии с предписанной стратегией дозирования.

Стратегия дозирования

Количество дозируемого реагента-восстановителя записано в программной карте двигателя в функции количества впрыскиваемого топлива и частоты вращения коленчатого вала. Система также осуществляет коррекцию дозирования в зависимости от температуры двигателя (оказывающей влияние на количество NO_x) и количества рабочих часов системы с целью учета ее старения.

Коэффициент коррекции дозирования при переходе между двумя стационарными рабочими режимами определяется, исходя из разности температуры каталитического нейтрализатора в стационарном режиме и температуры отработавших газов после каталитического нейтрализатора.

В частности, в случае каталитического нейтрализатора с высокой способностью к аккумулированию NH_3 рекомендуется моделирование работы в переходных режимах и количества фактически накопленного NH_3, поскольку способность каталитического нейтрализатора типа SCR к аккумулированию NH_3 снижается при повышении температуры.

Сажевый фильтр

Частицы сажи, выбрасываемые дизельным двигателем, могут быть эффективно удалены из отработавших газов при помощи дизельных сажевых фильтров (DPF).

Дизельные сажевые фильтры закрытого типа

Керамические сажевые фильтры состоят в основном из сотовой структуры из карбида кремния или кордиерита, имеющей большое количество параллельных каналов. Толщина стенок каналов составляет 300–400 мкм. Размеры каналов определяются их плотностью (количеством каналов на кв. см поверхности) (типичное значение: 16–47 каналов/кв. см.

Соседние каналы на обоих концах закрыты керамическими заглушками, что заставляет отработавшие газы проходить через пористые керамические стенки (см. рис. 3). При прохождении частиц сажи через пористые стенки они прилипают к ним (фильтрация в глубоком слое). В результате отложения слоя сажи на поверхности стенок каналов (на сторонах, противоположных впуску) происходит насыщение фильтра. Это обеспечивает высокоэффективную поверхностную фильтрацию для следующей рабочей фазы.

В отличие от фильтров с фильтрацией в глубоком слое в фильтрах с потоком через стенки частицы сажи накапливаются на поверхности керамических стенок (поверхностная фильтрация).

Кроме фильтров с симметричным расположением впускных и выпускных каналов также предлагаются фильтры с керамическими подложками типа «octosquare» (см. рис. 4). Они содержат впускные каналы восьмиугольного сечения и выпускные каналы квадратного сечения, причем площадь сечения восьмиугольных каналов больше. За счет большого сечения впускных каналов значительно по-

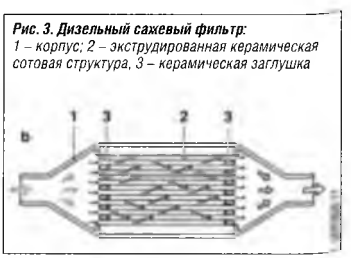


Рис. 3. Дизельный сажевый фильтр:
1 – корпус; 2 – экструдированная керамическая сотовая структура, 3 – керамическая заглушка

вышается способность сажевого фильтра к накопления золы и негорючих остатков сгоревшего смазочного масла.

Эффективность фильтрации керамических фильтров достигает 95 % во всем диапазоне размеров частиц (от 10 нм до 1 мкм). В сажевых фильтрах закрытого типа через пористые стенки проходит весь поток отработавших газов.

Сажевые фильтры открытого типа

В сажевых фильтрах открытого типа через стенки фильтра проходит только часть отработавших газов. Остальная часть газов проходит через фильтр без фильтрации. В зависимости от применения эффективность фильтрации фильтров открытого типа составляет 30–80 %.

По мере накопления частиц в фильтре увеличивается и доля отработавших газов, проходящих через фильтр без фильтрации, поэтому фильтр не создает препятствия для прохождения отработавших газов. Однако эффективность фильтрации со временем снижается. Фильтры открытого типа в основном используются в качестве сменных фильтров, поскольку регламентированная очистка не требуется. В то же время возможна очистка фильтров открытого фильтра с использованием CRT (сажеуловитель с постоянной регенерацией).

Регенерация

Накопление сажи в фильтре вызывает постепенное возрастание противодавления отработавших газов. Это обуславливает необходимость в регулярной регенерации фильтра.

Регенерация фильтра заключается в сжигании накопившейся в нем сажи. Углерод, из которого состоят частицы сажи, можно окислить (сжечь), используя кислород, постоянно присутствующий в отработавших газах, при температуре приблизительно 600 °C с образованием нетоксичного CO_2. Столь высокие температуры могут иметь место только во время работы двигателя с номинальной выходной мощностью. При нормальной эксплуатации автомобиля такие условия имеют место крайне редко. По этой причине необходимо принимать меры к снижению температуры сжигания сажи или повышению температуры отработавших газов.



Рис. 4. Конструкции керамического сажевого фильтра:
a – структура с каналами квадратного сечения;
b – структура с каналами восьмиугольного сечения

Способы повышения температуры отработавших газов внутри двигателя

К основным способам повышения температуры отработавших газов внутри двигателя относятся опережающий «сжигающий» или «аддитивный» дополнительный впрыск топлива, сдвиг основного впрыска топлива в сторону запаздывания и дросселирование воздуха на впуске. В зависимости от рабочего режима двигателя, во время регенерации используются один или несколько из этих способов. В некоторых рабочих режимах эти меры дополняются запаздыванием вторичного впрыска топлива. Это приводит к дополнительному повышению температуры отработавших газов вследствие окисления топлива в каталитическом нейтрализаторе окислительного типа («каталитический дожигатель»).

Система ввода добавок

Температура окисления сажи может быть понижена с 600 °C до приблизительно 450–500 °C при помощи добавок к дизельному топливу, обычно соединений церия или железа (см. рис. 5). Однако даже такая температура отработавших газов не всегда может быть достигнута во время работы двигателя. В результате сажа не может сжигаться непрерывно. Поэтому по достижении определенного уровня насыщения сажевого фильтра запускается процесс активной регенерации. С этой целью система управления двигателя изменяет соответствующие рабочие параметры, например, сдвигает момент впрыска топлива в сторону запаздывания, что вызывает повышение температуры отработавших газов до температуры, необходимой для сжигания сажи.

После регенерации присадка к топливу остается в фильтре в виде остаточных отложений (золы). Эта зола, а также зола, образующаяся при сжигании топлива и сгорании моторного масла, постепенно закупоривает фильтр, по-

вышая противодавление отработавших газов. Для предотвращения такого повышения противодавления принимаются меры к повышению накопительной способности керамических сажевых фильтров посредством максимального увеличения сечения впускных каналов. Это позволяет создавать фильтры, рассчитанные на весь срок службы автомобиля при нормальных условиях эксплуатации.

Что касается обычных керамических фильтров, при использовании регенерации в присутствии присадки к топливу и механической очистки, интервал замены фильтров составляет приблизительно 120 000 км.

Дизельный сажевый фильтр с каталитическим покрытием

Условия сжигания сажи можно также улучшить путем нанесения на сажевый фильтр покрытия из благородного металла (обычно платины). Однако, это дает меньший эффект по сравнению с использованием присадок к топливу.

Дизельный сажевый фильтр с каталитическим покрытием (CDPF), так же как при использовании добавок требует повышения температуры отработавших газов. В то же время, по сравнению с системой ввода добавок, он имеет преимущество, заключающееся в том, что в фильтре не накапливается зола.

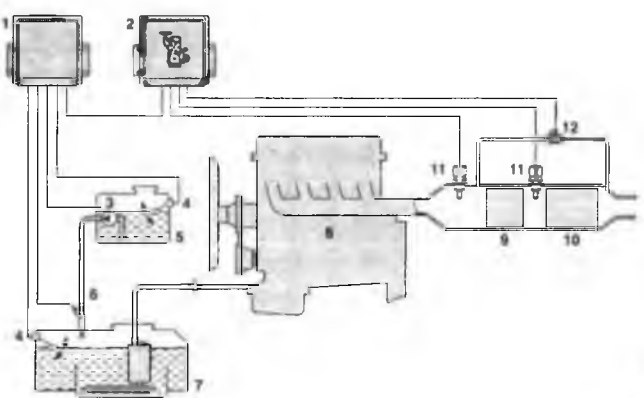
Сажевый фильтр с каталитическим покрытием выполняет несколько функций: окисление CO и HC, окисление NO до NO_x, и окисление CO до CO_2.

Система CRT

Двигатели грузовых автомобилей чаще работают вблизи максимального крутящего момента по сравнению с легковыми автомобилями, что приводит к сравнительно высокому количеству выбросов NO_x. Поэтому на грузовых автомобилях возможна непрерывная регенерация сажевого фильтра с использованием системы CRT (сажеуловитель с непрерывной регенерацией).

В соответствии с этим принципом сажа сгорает в присутствии NO_2 при температурах от 300 до 450 °C. При таких температурах процесс стабильно протекает, если массовое соотношение NO_2 и сажи составляет более 8 : 1. Для использования этого процесса перед сажевым фильтром устанавливается каталитический нейтрализатор окислительного типа, который окисляет NO до NO_2. В большинстве случаев это обеспечивает идеальные условия для регенерации с использованием системы CRT на грузовых автомобилях при нормальной эксплуатации. Этот метод также известен под названием «пассивной регенерации», поскольку сажа сжигается непрерывно без принятия каких-либо дополнительных мер.

Рис. 5. Сажевый фильтр с системой ввода присадки к топливу:
1 – блок управления вводом присадки; 2 – блок управления двигателем; 3 – насос подачи присадки; 4 – датчик уровня, 5 – бачок с присадкой; 6 – форсунка; 7 – топливный бак; 8 – дизельный двигатель; 9 – каталитический нейтрализатор окислительного типа; 10 – сажевый фильтр, 11 – датчик температуры; 12 – датчик периода давления



Система HCI

Для активной регенерации сажевых фильтров необходимо повысить температуру в фильтре до значения более 600 °C. Это может быть достигнуто посредством изменения настроек двигателя. Однако при неблагоприятных условиях, например, в случае слишком большого расстояния между сажевым фильтром и двигателем, такие меры становятся слишком сложными. В этом случае используется система HCI (система впрыска углеводородов). Дизельное топливо впрыскивается и испаряется перед каталитическим нейтрализатором (см. рис. 6) и каталитически сжигается в нем. Образующееся при сжигании топлива тепло используется для регенерации сажевого фильтра.

Алгоритмы управления системой HCI заложены в отдельный блок управления дозированием или блок управления двигателем. При этом важной входной переменной является насыщение сажевого фильтра.

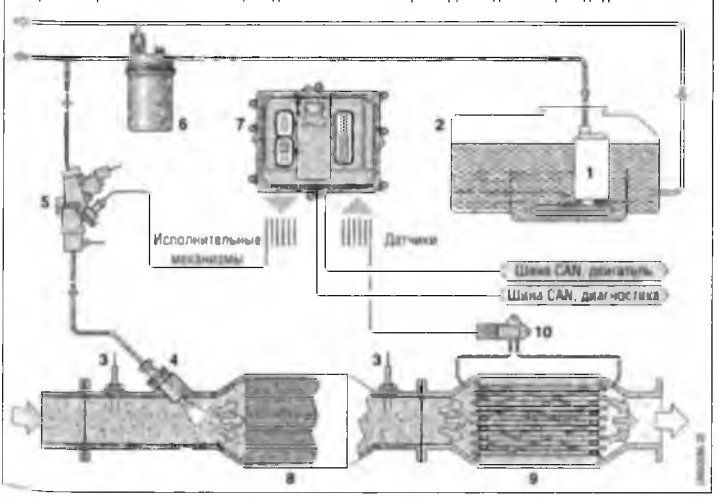
Детектирование насыщения

Для детектирования насыщения сажевого фильтра используются два параллельных процесса. Сопротивление потоку в сажевом фильтре вычисляется, исходя из перепада давления в фильтре и объемного расхода отработавших газов. Эти параметры определяют проницаемость фильтра и, следовательно, массу сажи.

Дополнительно для вычисления массы сажи, скопившейся в фильтре, используется модель. Эта модель включает массу частиц сажи в отработавших газах. Система также осуществляет динамическую коррекцию, учитывающую содержание в отработавших газах остаточного кислорода, а также непрерывное окисление частиц сажи диоксидом азота NO_2. Во время термической регенерации количество сгоревшей сажи вычисляется, исходя из температуры сажевого фильтра и массового расхода кислорода.

Общая масса сажи вычисляется, исходя из значений массы, определенных в ходе обоих процессов, и это становится ключевым фактором стратегии регенерации.

Рис. 6. Система HCI (система впрыска углеводородов):
1 – топливный насос; 2 – топливный бак; 3 – датчик температуры; 4 – модуль дозирования HC; 5 – блок дозирования HC; 6 – топливный фильтр; 7 – блок управления двигателем; 8 – дизельный каталитический нейтрализатор окислительного типа; 9 – дизельный сажевый фильтр; 10 – датчик перепада давления



Гибридные приводы

Гибридные автомобили (HEV) сочетают двигатель внутреннего сгорания и, как минимум, один электропривод. В этом отношении имеется ряд конфигураций, выполняющих различные цели, и отличающиеся степенью использования электроэнергии для приведения автомобиля в движение. Использование гибридных приводов преследует три следующие основные цели (см. рис. 2): снижение расхода топлива и, следовательно, выбросов CO_2, снижение токсичности отработавших газов и увеличение крутящего момента и мощности.

Рис. 1. Кривые крутящего момента:
1 – результирующий гибридный привод;
2 – стандартный двигатель внутреннего сгорания с рабочим объемом 1,6 л; 3 – двигатель внутреннего сгорания с рабочим объемом 1,2 л;
4 – электродвигатель, 15 кВт



Характеристики

Для питания электропривода гибридного автомобиля требуется тяговая аккумуляторная батарея. В настоящее время используются никель-металлгидридные или литий-ионные тяговые аккумуляторные батареи с относительно высоким уровнем напряжения от 200 до 400 В.

Электропривод состоит из электродвигателя и инвертора. Применяемые электродвигатели, как правило, представляют собой синхронные машины с постоянными магнитами, отличающиеся высокой плотностью мощности.

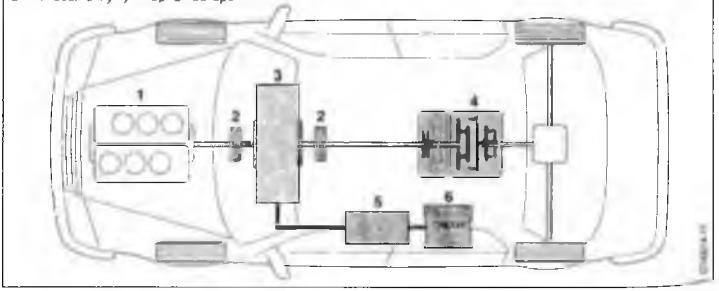
Электропривод обеспечивает высокий крутящий момент при низких частотах вращения вала. Таким образом, он идеально дополняет двигатель внутреннего сгорания, крутящий момент которого начинает возрастать только по достижении средних частот вращения. Таким образом, электропривод и двигатель внутреннего сгорания совместно способны обеспечить высокие динамические характеристики автомобиля при любых условиях движения (см. рис. 1).

Преимущества гибридных приводов

По сравнению с обычной кинематической цепью привода сочетание двигателя внутреннего сгорания и электроприводов имеет следующие преимущества.

Помощь, оказываемая электроприводом, дает возможность использовать двигатель внутреннего сгорания в основном в диапазоне его наилучшего к.п.д. или минимального

Рис. 2. Принцип действия гибридного автомобиля на примере параллельного гибридного привода:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – сцепление; 3 – электродвигатель; 4 – трансмиссия; 5 – инвертор; 6 – тяговая аккумуляторная батарея



количества токсичных выбросов (оптимизация рабочей точки).

Комбинация с электроприводами позволяет использовать двигатели внутреннего сгорания меньшего рабочего объема при такой же общей эффективной мощности.

Кроме того, гибридный привод позволяет использовать трансмиссию с более высокими передаточными отношениями с сохранением динамических характеристик автомобиля.

Работа электропривода в генераторном режиме во время торможения дает возможность преобразования части кинетической энергии автомобиля в электроэнергию. Эта электроэнергия может накапливаться в аккумуляторной батарее и в дальнейшем использоваться для привода автомобиля.

Некоторые конфигурации электроприводов позволяют автомобилю использовать для движения только электропривод. В этом случае двигатель внутреннего сгорания выключается, и автомобиль движется с «нулевыми» выбросами.



Рис. 3. Рекуперативное торможение:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – электрическая машина; 3 – тяговый аккумулятор

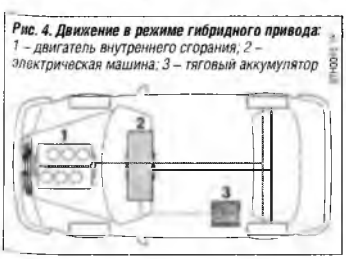


Рис. 4. Движение в режиме гибридного привода:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – электрическая машина; 3 – тяговый аккумулятор

Функции

В зависимости от условий двигатель внутреннего сгорания и электропривод вносят в движение автомобиля различный вклад. Распределение мощности между двумя приводами определяет система управления гибридным приводом. Взаимодействие двигателя внутреннего сгорания, электропривода и тяговой аккумуляторной батареи определяет различные режимы работы системы.

Пуск/стоп

Функция «Пуск/стоп» позволяет временно выключать двигатель внутреннего сгорания без участия водителя (поворота ключа зажигания). При этом двигатель выключается во время остановок и автоматически запускается при возобновлении движения.

Рекуперативное торможение

Во время рекуперативного торможения автомобиль тормозится не за счет тормозного момента, создаваемого обычной тормозной системой (или не только за счет этого момента), а за счет тормозного момента, создаваемого электроприводом, работающим в генераторном режиме. При этом электропривод преобразует кинетическую энергию автомобиля в электроэнергию, которая запасается в тяговой аккумуляторной батарее (см. рис. 3).

Рекуперативное торможение также известно под названиями рекуперации или регенерации.

Гибридный привод

Понятие гибридного привода относится к режимам, при которых двигатель внутреннего сгорания и электропривод создают приводной крутящий момент совместно (см. рис. 4).

Режим гибридного привода можно разделить на генераторный и двигательный режимы работы. В генераторном режиме происходит зарядка тяговой аккумуляторной батареи (см. рис. 5). При этом двигатель внутреннего сгорания вырабатывает больше энергии, чем это требуется для приведения автомобиля в движение. Избыточная энергия поступает в электропривод и преобразуется в электроэнергию, которая запасается в тяговой аккумуляторной батареи.

В двигательном режиме тяговая аккумуляторная батарея разряжается (см. рис. 4). Электропривод помогает двигателю внутреннего сгорания в создании требуемой тяговой мощности.

Движение на электроприводе
В этом режиме автомобиль приводится в движение только электроприводом. При этом двигатель внутреннего сгорания механически отсоединяется от кинематической цепи привода автомобиля и выключается (см. рис. 6). В этом режиме автомобиль движется практически бесшумно и не выбрасывает в атмосферу отработавшие газы.

Зарядка аккумуляторной батареи от электросети
Тяговая аккумуляторная батарея заряжается от электросети с использованием специального зарядного устройства.

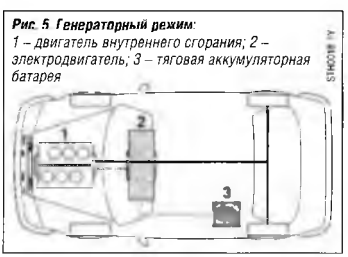


Рис. 5. Генераторный режим:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – электродвигатель; 3 – тяговая аккумуляторная батарея



Рис. 6. Движение только на электроприводе:
1 – двигатель внутреннего сгорания, 2 – электродвигатель; 3 – тяговая аккумуляторная батарея

Функциональная классификация

В зависимости от выполняемых функций существуют следующие системы гибридного привода (см. табл. 1).

Система «Пуск/стоп»
Система «Пуск/стоп» выполняет функции пуска/остановки двигателя внутреннего сгорания и рекуперации. С этой целью осуществляется специальная адаптация режима работы генератора. В нормальном режиме движения генератор работает в режиме низкой выходной мощности. Во время движения накатом выходная мощность генератора увеличивается с тем, чтобы использовать для выработки электроэнергии большую часть кинетической энергии, высвобождающейся при замедлении автомобиля.

При помощи системы «Пуск/стоп» может быть получена экономия топлива 4–5 % (в ходе испытаний NEDC (новый европейский цикл движения)).

«Слабый гибридный привод»
Категория «Слабый гибридный привод» в дополнение к функциям пуска/остановки двигателя внутреннего сгорания предлагает функции гибридного привода, включая генераторный и двигательный режимы работы электропривода. Движение только на электроприводе невозможно. Фактически электропривод может самостоятельно приводить автомобиль в движение, но двигатель внутреннего сгорания всегда участвует в этом процессе.

Система «Слабый гибридный привод» позволяет достигнуть в ходе испытаний NEDC экономии топлива от 10 до 15 %.

«Сильный гибридный привод»
Система «Сильный гибридный привод» в дополнение к функциям системы «Слабый гибридный привод», может приводить автомобиль в движение только на электроприводе (на небольшие расстояния). На время движения на электроприводе двигатель внутреннего сгорания выключается.

Система «Сильный гибридный привод» позволяет достигнуть в ходе испытаний NEDC экономии топлива от 20 до 30%.

«Заряжаемый гибридный привод»
Система «Заряжаемый гибридный привод» является разновидностью системы «Сильный гибридный привод». Она предполагает воз-

Таблица 1. Системы гибридного привода и их функции

		Системы гибридного привода			
		«Пуск/стоп» ДВС	«Слабый гибридный привод»	«Сильный гибридный привод»	«Заряжаемый гибридный привод»
Функции	«Пуск/стоп» ДВС	●	●	●	●
	Рекуперация	●	●	●	●
	Совместная работа ДВС и электропривода		●	●	●
	Движение только на электроприводе			●	●
	Зарядка тяговой аккумуляторной батареи от электросети				●

можность зарядки тяговой аккумуляторной батареи от электросети при помощи специального зарядного устройства. В таких системах используются тяговые аккумуляторные батареи большой емкости, позволяющие проезжать большие расстояния только на электроприводе.

Система «Заряжаемый гибридный привод» позволяет достигнуть в ходе испытаний NEDC экономии топлива от 50 до 70%. Такие значения обусловлены тем, что некоторая часть энергии, необходимой для приведения автомобиля в движение, поступает из электросети и не имеет прямого отношения к снижению расхода топлива.

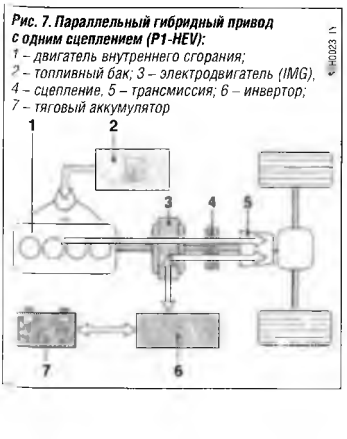


Рис. 7. Параллельный гибридный привод с одним сцеплением (P1-HEV):
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – топливный бак; 3 – электродвигатель (IMG), 4 – сцепление, 5 – трансмиссия; 6 – инвертор; 7 – тяговый аккумулятор

Конфигурации привода

В гибридных автомобилях применяются различные конфигурации двигателя внутреннего сгорания, трансмиссии и электроприводов. В соответствии с различными конфигурациями распределения энергетических потоков гибридные автомобили можно разделить на следующие категории: параллельные, последовательные и разделенные по мощности гибридные приводы.

Параллельный гибридный привод

Принцип действия

На автомобилях с параллельным гибридным приводом двигатель внутреннего сгорания и электропривод участвуют в приведении автомобиля в движение независимо от друг друга (см. рис. 7). Два источника энергии – двигатель внутреннего сгорания и тяговая аккумуляторная батарея работают параллельно друг другу, совместно генерируя энергию, необходимую для приведения автомобиля в движение.

Параллельный гибридный привод может иметь описанные выше варианты «Слабый гибридный привод» («пуск/стоп», рекуперативное торможение и гибридное движение) или «сильный гибридный привод» (дополнительно движение только на электроприводе).

Фундаментальным преимуществом параллельного гибридного привода является возможность сохранения обычной кинематической цепи привода. Объем работ, связанных с разработкой и установкой систем параллельного гибридного привода меньше по сравнению с последовательными и разделенными гибридными приводами, поскольку для таких систем требуется только один электропривод малой электрической мощности, и объем работ по адаптации обычной кинематической цепи привода сравнительно невелик.

«Слабый» параллельный гибридный привод

В варианте слабого параллельного гибридного привода (см. рис. 7) электропривод прямо соединен с двигателем внутреннего сгорания. В отличие от последовательного и разделенного гибридного привода частота вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания не может регулироваться независимо от скорости вращения электропривода.

Двигатель внутреннего сгорания не может быть механически отсоединен от электропривода. Тормозящий момент двигателя внутреннего сгорания снижает потенциал рекуперативного торможения.

Движение автомобиля только на электроприводе при такой конфигурации невозможно. На самом деле электропривод может служить в качестве единственного источника энергии, но во время движения двигатель внутреннего сгорания всегда соединен с ним.

Электропривод может использоваться в качестве вспомогательного источника энергии и, следовательно, служить для улучшения динамических характеристик автомобиля.

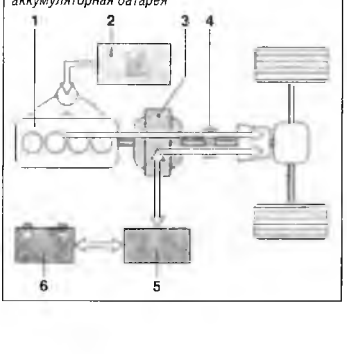
«Сильный» параллельный гибридный привод

«Сильный» параллельный гибридный привод может быть сконфигурирован несколькими способами. Очевидной конфигурацией является прямое расширение возможностей «слабого» гибридного привода (см. рис. 8). Между двигателем внутреннего сгорания и электроприводом устанавливается муфта, позволяющая отсоединять двигатель внутреннего сгорания от электропривода и присоединять его к электроприводу. Это дает возможность движения только на электроприводе. Двигатель внутреннего сгорания может быть отсоединен также и во время замедления автомобиля. Во-первых, это повышает потенциал рекуперативного торможения. Во-вторых, это дает возможность движения «накатом», когда автомобиль замедляется только под действием аэродинамического сопротивления и трения качения шин.

Чтобы такая конфигурация привода была приемлемой, очень важно, чтобы двигатель внутреннего сгорания мог запускаться во время движения на электроприводе без дискомфорта для водителя и пассажиров. Эта цель может быть достигнута двумя способами. В простейшем случае двигатель внутреннего сгорания запускается отдельным стартером, когда сцепление выключено, и запуск двигателя не оказывает нежелательного влияния на движение. Однако, это требует наличия отдельного стартера, без которого в остальных случаях на гибридных автомобилях можно обойтись.

Другим вариантом является управление двигателем внутреннего сгорания, электроприводом и сцеплением таким образом, чтобы скомпенсировать влияние запуска двигателя на движение автомобиля. С этой целью «интеллектуальная система управления» обрабатывает сигналы датчиков двигателя внутреннего сгорания, электропривода и сцепления. Сцепление должно быть способно автоматически адаптироваться к изменению условий и отрабатывать сигналы системы управления.

Рис. 8. Параллельный гибридный привод с двумя сцеплениями (P2-HEV):
1 – двигатель внутреннего сгорания, 2 – топливный бак; 3 – электродвигатель, генератор; 4 – сцепление; 5 – инвертор; 6 – тяговая аккумуляторная батарея



«Сильный» гибридный привод с трансмиссией с двойным сцеплением

Установка дополнительного сцепления в конфигурации «сильного» параллельного гибридного привода приводит к увеличению длины кинематической цепи привода. На некоторых автомобилях требуемое для установки привода такой конфигурации пространство оказывается недоступным. Эту проблему можно решить, встроив электропривод в трансмиссию с двойным сцеплением (см. рис. 9). При этом электропривод более не соединен с коленчатым валом двигателя внутреннего сгорания. Вместо этого он соединяется с подузлом трансмиссии с двойным сцеплением. В этой конфигурации дополнительное разъединяющее сцепление между двигателем и электроприводом отсутствует. Движение только на электроприводе при остановленном двигателе возможно за счет выключения двойного

сцепления трансмиссии. Таким образом, эта конфигурация также является вариантом параллельного «сильного» гибридного привода. В зависимости от выбранной передачи трансмиссии, могут иметь место различные передаточные отношения между двигателем и электроприводом. Это дает дополнительную степень свободы в отношении управления гибридным приводом, что может быть использовано для дальнейшего снижения расхода топлива.

Разделенный по осям параллельный гибридный привод

Еще одна конфигурация параллельного гибридного привода заключается в электроприводе отдельной оси (см. рис. 10). Здесь обычная кинематическая цепь привода, включающая двигатель внутреннего сгорания и трансмиссию на ведущей оси, объединена с осью и электроприводом. Такую конфигурацию можно отнести к «сильному» гибридному приводу, поскольку двигатель внутреннего сгорания может быть выключен, и движение может осуществляться только на электроприводе. Такая конфигурация требует наличия полуавтоматической трансмиссии и системы пуска/останова двигателя внутреннего сгорания.

Эта конфигурация также классифицируется как параллельный гибридный привод, поскольку в ней тяговые мощности двигателя внутреннего сгорания и электропривода также складываются. Однако, в отличие от конфигураций, описанных выше, точка сложения этих мощностей находится не в пределах кинематической цепи привода, а в плоскости ведущих колес.

В этом случае зарядка тяговой аккумуляторной батареи осуществляется за счет избыточной мощности двигателя внутреннего сгорания с одновременным торможением со стороны электропривода. Это означает, что тяговая аккумуляторная батарея не может заряжаться, когда автомобиль неподвижен.

Взаимодействие двигателя внутреннего сгорания и электропривода создает полноприводную конфигурацию автомобиля. Распределение крутящих моментов может изменяться посредством регулирования в широких пределах тягового момента электропривода. Однако, постоянный полный привод может быть реализован только, когда в дополнение к электроприводу, питающемуся от тяговой аккумуляторной батареи, имеется второй электропривод, соединенный (установленный на коленчатом вале или соединенный с ним ременной передачей), который может вырабатывать требуемую электроэнергию. Это позволяет заряжать тяговую аккумуляторную батарею также, когда автомобиль неподвижен.

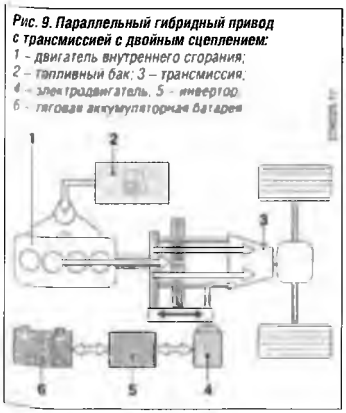


Рис. 9. Параллельный гибридный привод с трансмиссией с двойным сцеплением:
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – топливный бак; 3 – трансмиссия; 4 – электродвигатель; 5 – инвертор; 6 – тяговая аккумуляторная батарея

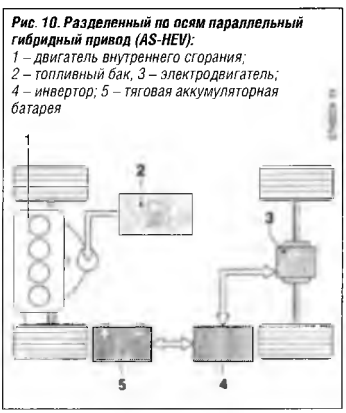


Рис. 10. Разделенный по осям параллельный гибридный привод (AS-HEV):
1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – топливный бак, 3 – электродвигатель; 4 – инвертор; 5 – тяговая аккумуляторная батарея

Последовательный гибридный привод

На автомобилях с последовательным гибридным приводом (см. рис. 11) двигатель внутреннего сгорания приводит во вращение электропривод, который работает в качестве генератора. Генерируемая таким образом электроэнергия, совместно с тяговой аккумуляторной батареей используется для питания второго электропривода, который приводит автомобиль в движение. С точки зрения распределения потоков энергии здесь имеет место последовательное соединение.

Последовательный гибридный привод можно отнести к «сильному» гибридному приводу, поскольку при такой конфигурации могут выполняться все требуемые функции (пуск/останов двигателя внутреннего сгорания, рекуперативное торможение, гибридный привод, движение только на электроприводе).

Преимущества:

В связи с отсутствием механического соединения между двигателем внутреннего сгорания и ведущими колесами эта конфигурация дает определенные преимущества. Так, в кинематической цепи привода не требуется наличия трансмиссии с обычным диапазоном передаточных отношений. Это дает дополнительное свободное пространство для размещения всей системы привода.

Кроме того, запуск двигателя внутреннего сгорания во время движения на электроприводе не оказывает нежелательного влияния на движение автомобиля.

Основное преимущество заключается в возможности свободного выбора рабочего режима двигателя. Это способствует снижению расхода топлива и токсичности отработавших газов. Также работа двигателя может быть оптимизирована в пределах ограниченного рабочего диапазона.

Недостатки:

Недостатки последовательного гибридного привода заключаются в необходимости двойного преобразования электроэнергии. Потери, связанные с этим двойным преобразованием, выше, чем в случае чисто механической передачи мощности посредством трансмиссии.

Кроме того, для передачи мощности двигателя внутреннего сгорания требуются два электропривода одинаковой мощности.

При низких скоростях последовательный гибридный привод, несмотря на большие потери, дает экономию топлива, поскольку при этих условиях преимущества свободного выбора рабочего режима двигателя перевешивают недостатки такой конфигурации. При средних и высоких скоростях ситуация меняется на противоположную.

Применение последовательного гибридного привода

В настоящее время последовательные гибридные приводы применяются в основном на дизель-электрических локомотивах и городских автобусах.

Рис. 11. Последовательный гибридный привод (S-HEV):
1 – двигатель внутреннего сгорания, 2 – топливный бак; 3 – генератор; 4 – электродвигатель; 5 – инвертор; 6 – тяговая аккумуляторная батарея



Рис. 12 Последовательно параллельный гибридный привод (SP-HEV):
1 – двигатель внутреннего сгорания;
2 – топливный бак; 3 – генератор; 4 – сцепление; 5 – электродвигатель; 6 – трансмиссия; 7 – инвертор; 8 – тяговая аккумуляторная батарея



На легковых автомобилях конфигурации последовательного гибридного привода все более широко используются на электромобилях, рабочий диапазон которых расширяется за счет двигателя внутреннего сгорания.

Последовательно-параллельный гибридный привод

Последовательно-параллельный гибридный привод представляет собой расширение последовательного привода (см. рис. 12) за счет механического соединения двух электроприводов при помощи управляемого сцепления.

Последовательно-параллельный гибридный привод, сохраняя преимущества последовательного привода в диапазоне низких скоростей, избавлен от его недостатков в диапазоне средних и высоких скоростей. Когда сцепление включено, последовательно-параллельный гибридный привод работает как параллельный привод.

Поскольку двойное преобразование электроэнергии имеет место только в диапазоне низких скоростей и значений выходной мощности, для последовательно-параллельного гибридного привода достаточно электроприводов меньшей мощности, чем для последовательного привода.

В то же время, последовательно-параллельный привод теряет указанное выше преимущество последовательного привода в отношении компактности в связи с механическим соединением двигателя внутреннего сгорания с ведущими колесами. По сравнению с параллельным гибридным приводом для выполнения такой же задачи требуются два электропривода.

Гибридный привод с разделением мощности

Принцип действия

Гибридный привод с разделением мощности сочетает особенности параллельного и последовательного гибридных приводов. Некоторая часть мощности двигателя внутреннего сгорания преобразуется в электроэнергию первым электроприводом, а оставшаяся часть, совместно со вторым электроприводом, используется для приведения автомобиля в движение. Гибридный привод с разделением мощности также можно отнести к «сильному» гибридному приводу, поскольку при такой конфигурации могут выполняться все требуемые функции (пуск/останов двигателя внутреннего сгорания, рекуперативное торможение, гибридный привод, движение только на электроприводе).

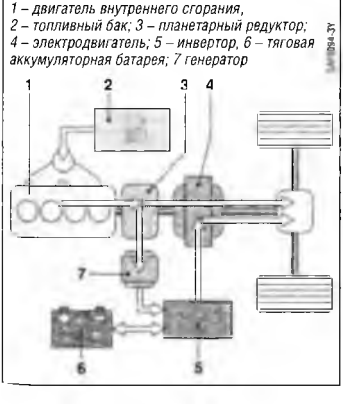
Однорежимный гибридный привод

Концепция однорежимного гибридного привода поясняется приведенной ниже схемой (см. рис. 13). Центральным компонентом конфигурации является планетарный редуктор, посредством своих трех выходных валов соединенный с двигателем внутреннего сгорания и двумя электроприводами. Такая конфигурация позволяет изменять частоту вращения коленчатого вала независимо от скорости движения автомобиля. В соответствии с принятым термином «CVT-трансмиссия» (плавно регулируемая трансмиссия), здесь имеет место «eCVT-трансмиссия» (электрическая CVT-трансмиссия).

Некоторая часть мощности двигателя внутреннего сгорания передается кинематической цепью на ведущие колеса. Оставшаяся часть мощности передается с двойным преобразованием энергии на ведущие колеса через электроприводы.

В случае низкой потребности в мощности может использоваться электрический способ передачи мощности, аналогичный последовательному гибридному приводу. При высокой потребности в мощности может быть использована механическая кинематическая цепь. В отличие от последовательно-параллельного гибридного привода, здесь произвольное переключение между механическим и электрическим трактами передачи мощности невозможно. В зависимости от конфигурации планетарного редуктора, электроприводов и

Рис. 13. Гибридный привод с разделением мощности (однорежимная концепция):
1 – двигатель внутреннего сгорания,
2 – топливный бак; 3 – планетарный редуктор;
4 – электродвигатель; 5 – инвертор, 6 – тяговая аккумуляторная батарея; 7 генератор



двигателя внутреннего сгорания, возможны только строго определенные комбинации механического и электрического трактов передачи мощности.

Таким образом, гибридный привод с разделением мощности при низких и средних скоростях дает существенную экономию топлива. В то же время при высоких скоростях никакой дополнительной экономии топлива не достигается.

Аналогично последовательному гибридному приводу для гибридного привода с разделением мощности требуются электроприводы с относительно высокой выходной мощностью, в диапазоне установленной мощности двигателя внутреннего сгорания.

Двухрежимный гибридный привод

За счет установки второго планетарного редуктора однорежимный гибридный привод с разделением мощности может быть преобразован в двухрежимный гибридный привод.

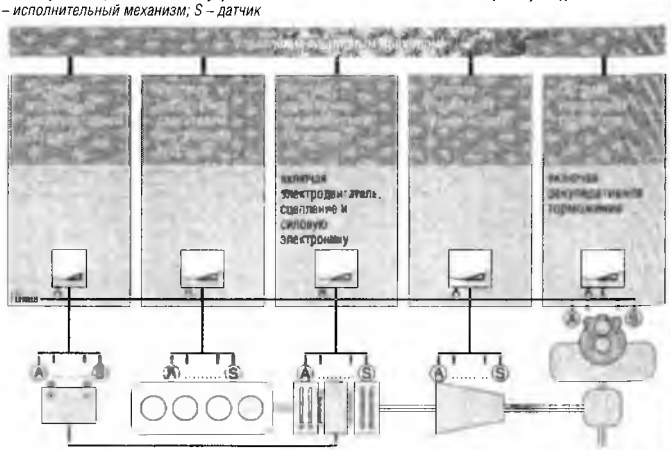
При этом увеличивается механическая сложность системы, но в то же время система становится более простой в электрическом отношении. Такая конфигурация позволяет использовать электроприводы меньшей мощности. Кроме того, по сравнению с однорежимным гибридным приводом достигается более высокая экономия топлива.

Системы управления гибридными приводами

Эффективность, которая может быть достигнута за счет гибридного привода, зависит не только от его конфигурации, но также в большой степени от системы управления высшего уровня. На рис. 14 приведен пример объединения в сеть отдельных компонентов и систем управления автомобиля с параллельным гибридным приводом. Система управления гибридным автомобилем высшего уровня координирует работу всей системы, подсистемы которой имеют свои собственные функции управления. К этим подсистемам относятся системы управления тяговой аккумуляторной батареей, двигателем внутреннего сгорания, электроприводом, трансмиссией и тормозной системой.

В дополнение к управлению подсистемами, система управления гибридным автомобилем также включает общую стратегию управления, оптимизирующую работу кинематической цепи привода. Выбранная стратегия управления оказывает влияние на расход топлива и токсичность отработавших газов за счет оптимального управления такими функциями, как пуск/останов двигателя внутреннего сгорания, рекуперативное торможение,

Рис. 14. Организация сети систем управления компонентами кинематической цепи привода:
A – исполнительный механизм; S – датчик



движение в режиме гибридного привода или движение только на электроприводе.

Стратегия управления гибридным автомобилем

Стратегия управления определяет, каким образом мощность привода распределяется между двигателем внутреннего сгорания и электроприводом. Она также определяет степень использования потенциала снижения расхода топлива или токсичности отработавших газов. Стратегия управления также должна реализовывать различные функции гибридного привода, такие как регенерация электроэнергии, движение в режиме гибридного привода и движение только на электроприводе.

Выбор и переключение режимов осуществляется в зависимости от многочисленных условий, таких как, например, положение педали акселератора, степень зарядки тяговой аккумуляторной батареи и скорость движения автомобиля. В зависимости от целей оптимизации (снижение расхода топлива или снижение токсичности отработавших газов) различные компоненты гибридного автомобиля ведут себя по-разному.

Стратегия управления с целью снижения содержания NO_x

Автомобили с двигателем, работающим на обедненной смеси, уже достигают относительно низкого расхода топлива в диапазоне частичных нагрузок двигателя. Однако при работе двигателя в диапазоне частичных нагрузок потери на трение столь велики, что удельный расход топлива оказывается высоким. Кроме того, низкие температуры сгорания топлива и дефицит кислорода вызывают высокое содержание в отработавших газах оксида углерода и углеводородов.

В диапазоне низких нагрузок электропривод относительно небольшой мощности уже может заменить двигатель внутреннего сгорания. Если требуемая электроэнергия может регенерироваться посредством рекуперативного торможения, эта простая стратегия управления может дать большие преимущества в отношении снижения расхода топлива и токсичности отработавших газов.

На рис. 15, a показаны рабочие диапазоны, в которых двигатель внутреннего сгорания в основном работает во время испытаний NEDC (новый европейский цикл движения). Дизельный двигатель легкового автомобиля работает как в диапазоне низких нагрузок (т.е. с низким к.п.д. и высоким содержанием HC и CO в отработавших газах), так и в диапазоне средних и высоких нагрузок (т.е. с высоким содержанием в отработавших газах оксидов азота NO_x).

На рис. 15, b показан диапазон рабочих режимов для параллельного гибридного привода, который исключает работу двигателя внутреннего сгорания за счет движения только на электроприводе или увеличения нагрузки. Это с одной стороны снижает расход топлива, а с другой стороны снижает содержание в отработавших газах CO, HC и NO_x, которое в этом диапазоне является высоким. Чтобы достигнуть еще большего снижения содержания NO_x, можно снизить нагрузку в среднем диапазоне за счет совместной работы электропривода и двигателя внутреннего сгорания.

Стратегия управления с целью снижения содержания CO_2

На автомобиле с бензиновым двигателем, работающем на топливно-воздушной смеси, имеющей стехиометрический состав, может быть достигнуто чрезвычайно низкое содер-

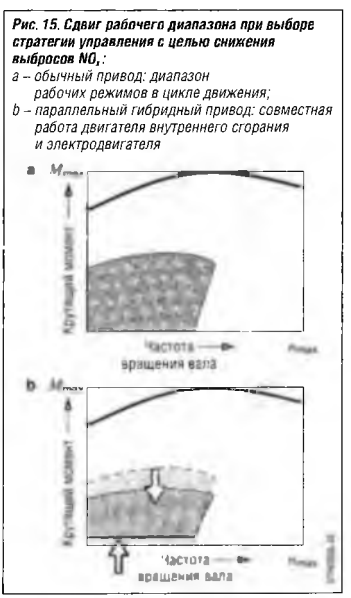
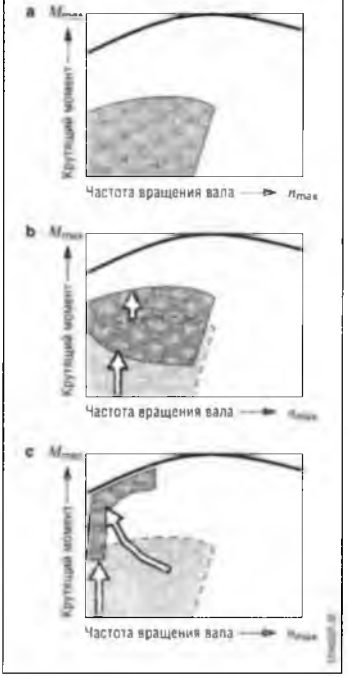


Рис. 15. Сдвиг рабочего диапазона при выборе стратегии управления с целью снижения выбросов NO_x:
a – обычный привод: диапазон рабочих режимов в цикле движения;
b – параллельный гибридный привод: совместная работа двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя

Рис. 16. Сдвиг рабочего диапазона при выборе стратегии управления с целью снижения выбросов CO_2:
a – обычный привод. диапазон рабочих режимов в цикле движения; b – параллельный гибридный привод: исключение низких нагрузок двигателя внутреннего сгорания посредством движения только на электроприводе с последующей зарядкой тяговой аккумуляторной батареи, c – гибридный привод с разделением мощности. сдвиг рабочих режимов в диапазон оптимального энергетического баланса кинематической цепи привода (эффект eCVT)



жание токсичных веществ в отработавших газах за счет использования трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. В отношении таких автомобилей основное внимание уделяется снижению расхода топлива и, следовательно, выбросов CO_2.

На рис. 16 показаны возможности оптимизации рабочего диапазона двигателя внутреннего сгорания для различных конфигураций привода для сведения к минимуму выбросов CO_2.

В ходе испытаний NEDC двигатели внутреннего сгорания на обычных автомобилях работают в диапазоне низких нагрузок и, следовательно, с субоптимальным к.п.д. (см. рис. 16, a). На автомобилях с параллельным гибридным приводом работы двигателя внутреннего сгорания в диапазоне низких нагрузок можно избежать за счет движения только на электроприводе (см. рис. 16, b). Поскольку требуемая электроэнергия, как правило, не может быть получена исключительно за счет рекуперации, электропривод работает в качестве генератора. По сравнению с обычным автомобилем это сдвигает рабочий диапазон двигателя внутреннего сгорания в область более высоких нагрузок и, следовательно, более высоких значений к.п.д.

В случае гибридного автомобиля с разделением мощности (см. рис. 16, c) на рабочий диапазон двигателя внутреннего сгорания накладываются более строгие ограничения, чем на автомобиле с параллельным гибридным приводом. Как правило, управление двигателем внутреннего сгорания осуществляется в зависимости от частоты вращения коленчатого вала. Двигатель работает в диапазоне нагрузок, при которых вся кинематическая цепь привода находится в оптимальных энергетических условиях.

Рекуперативная система торможения

В случае рекуперативного торможения (также известного под названием рекуперации), кинетическая энергия автомобиля преобразуется в электроэнергию электроприводом, который при этом работает в качестве генератора. Таким образом, некоторая часть энергии, в случае обычных тормозных систем теряющаяся в виде фрикционного тепла, преобразуется в электроэнергию, которая запасается в тяговой аккумуляторной батарее, и затем используется для привода автомобиля.

Имитация тормозного момента

В случае «сильного» гибридного привода с целью рекуперативного торможения двигатель внутреннего сгорания отсоединяется от кинематической цепи привода, и тормозящий момент заменяется эквивалентным генераторным тормозным моментом электродвигателя (имитация тормозного момента). Высвобождаемая энергия запасается в тяговой аккумуляторной батарее.

Если двигатель внутреннего сгорания не может быть отсоединен (как в случае «слабого» гибридного привода) более низкий генераторный момент электродвигателя может действовать совместно с тормозным моментом двигателя (увеличение тормозного момента).

Рекуперативная тормозная система

Во время торможения электропривод может регулировать величину дополнительного тормозного момента, т.е. процесс имитации и увеличения тормозного момента. При том же положении педали тормоза автомобиль замедляется быстрее, чем в случае применения обычной тормозной системы. Однако с учетом ограничений, налагаемых рабочими характеристиками электропривода, значительного замедления не достигается.

Проблему представляет различный тормозной момент во время отдельных процессов торможения, в результате чего имеет место нестабильность тормозного усилия. Отсюда следует, что рекуперативная тормозная система должна адаптироваться в соответствии со степенью зарядки тяговой аккумуляторной батареи и температурной нагрузкой электропривода. Например, если температура тяговой аккумуляторной батареи значительно возрастает после нескольких торможений, при определенных условиях, во избежание температурной перегрузки системы, необходима рекуперация энергии.

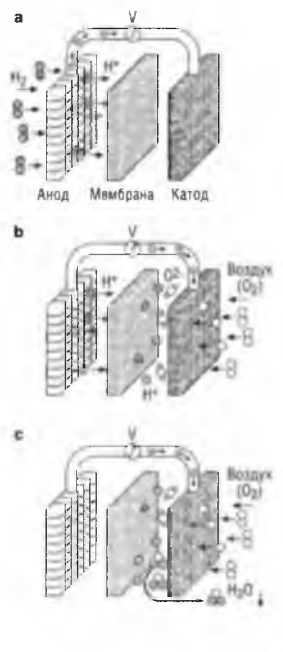
Кооперативно-рекуперативная тормозная система

В случае более высоких значений замедления система рабочих тормозов автомобиля должна быть модифицирована с целью еще большего использования для торможения кинетической энергии. С этой целью весь момент трения, создаваемый рабочими тормозами, или его часть должны быть заменены рекуперативным тормозным моментом. При этом величина замедления не должна изменяться при неизменных положении педали тормоза и прилагаемом к ней усилии. Это реализуется в кооперативно-регенеративной тормозной системе, где система управления автомобилем и тормозная система взаимодействуют таким образом, что фрикционный тормозной момент в максимально возможной степени заменяется генераторным тормозным моментом электропривода.

Топливные элементы для привода автомобилей

Топливные элементы представляют собой электрохимические преобразователи энергии, заключенной в топливе, непосредственно в электроэнергию. В водородно-кислородном топливном элементе водород вступает в реакцию «холодного горения» с кислородом, в процессе которой образуется вода и генерируется электрический ток. Топливные элементы не содержат движущихся частей, работают без механического трения, с низким уровнем шума и без загрязняющих окружающую среду выбросов.

Рис. 1. Принцип действия топливного элемента типа PEM:
a – окисление водорода;
b – восстановление кислорода;
c – образование воды



Принцип действия

Топливный элемент состоит из двух элементов (анода и катода), разделенных электролитом (см. рис. 1). Электролит непроницаем для электронов. Электроды соединяются друг с другом внешней электрической цепью.

На автомобилях в основном применяются топливные элементы с полимерной мембраной в качестве электролита, называемой также протонообменной (PEM) (см. рис. 2). Принцип действия топливных элементов описан ниже на примере элементов этого типа.

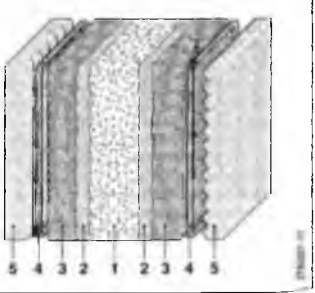
Принцип действия топливного элемента типа PEM

В топливном элементе типа PEM водород направляется к аноду, где он окисляется. При это образуются ионы H+ (протоны) и электроны (см. рис. 1, a).

Анод: $2\,H_2 \rightarrow 4\,H^+ + 4\,e^-$.

Электролит можно рассматривать как проводящую протоны полимерную мембрану. Электролит проницаем для протонов, но не для электронов. Протоны H+, образующиеся на аноде, проходят через мембрану и достигают катода. Для того чтобы через мембрану могли проходить протоны, она должна быть достаточно увлажнена. Кислород направляется к катоду, где происходит его вос-

Рис. 2. Структура топливного элемента типа PEM:
1 – мембрана (слой электролита); 2 – электроды (слой катализатора); 3 – слои газовой диффузии; 4 – уплотнения; 5 – биполярные пластины



становление (см. рис. 1, b). Восстановление происходит за счет электронов, проходящих от анода к катоду по внешней электрической цепи.

Катод: $O_2 + 4\,e^- \rightarrow 2\,O^{2-}$.

На следующей стадии реакции ионы O^{2-} реагируют с протонами с образованием воды.

Катод: $4\,H^+ + 2\,O^{2-} \rightarrow 2\,H_2O$.

В результате общей реакции, протекающей в топливном элементе, из водорода и кислорода образуется вода (см. рис. 1, c). В отличие от реакции с образованием гремучего газа, в ходе которой водород и кислород реагируют друг с другом взрывообразно, здесь реакция протекает в форме «холодного горения», поскольку стадии реакции протекают раздельно на аноде и катоде.

Общая реакция: $2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$.

Описанные выше реакции протекают на каталитических покрытиях электродов. В качестве катализатора чаще всего используется платина.

Теоретическое напряжение одного водородно-кислородного топливного элемента при температуре 25 °C составляет 1,23 В. Это значение получено из стандартных значений потенциалов электродов. Однако на практике, во время работы элемента, это напряжение не достигается; оно составляет 0,5–1,0 В. Потерю напряжения можно объяснить внутренним сопротивлением элемента или ограничениями, налагаемыми газовой диффузией (см. рис. 3). В основном напряжение зависит от температуры, стехиометрических отношений водорода и кислорода к количеству произведенного электричества, парциального давления водорода и кислорода и плотности тока.

На автомобилях применяются батареи топливных элементов мощностью от 5 до 100 кВт. Чтобы получить высокие напряжения, требуемые для технического применения элементов, элементы последовательно соединяются в батареи (см. рис. 4). Батареи могут включать от 40 до 450 элементов, т.е. их максимальное рабочее напряжение составляет от 40 до 450 В.

Высокие значения электрического тока достигаются за счет соответствующей площади поверхности мембраны. Значения выходного тока батарей топливных элементов для автомобилей достигает 500 А.

Рис. 3. Электрические характеристики топливного элемента:
1 – напряжение; 2 – удельная мощность

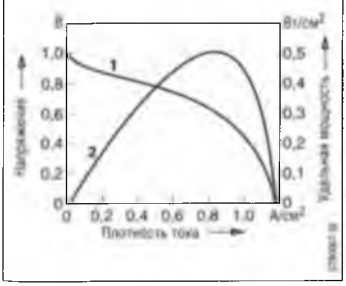
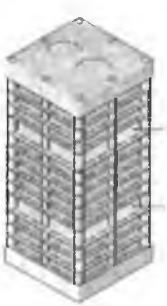


Рис. 4. Структура батареи топливных элементов:
1 – отдельный топливный элемент



Принцип действия системы топливных элементов

Для использования батареи топливных элементов требуются подсистемы подачи водорода и кислорода (см. рис. 5). В принципе, эти системы могут быть реализованы самыми различными способами. Описываемый здесь вариант используется во многих случаях.

Система подачи водорода

Запас водорода хранится в баллоне высокого давления (700 бар). При помощи редуктора давление водорода понижается приблизительно до 10 бар, и водород поступает в газовый инжектор.

Инжектор представляет собой электромагнитный клапан, при помощи которого давление водорода устанавливается на стороне анода. В отличие от топливных форсунок двигателей внутреннего сгорания инжектор водорода должен обеспечивать постоянный массовый расход. Типичное значение расхода водорода при мощности 100 кВт составляет 2,1 г/с. Максимальное значение давления водорода составляет 2,5 бар.

Для работы батареи топливных элементов требуется постоянный сквозной поток водорода на стороне анода (мера гомогенизации). С этой целью в системе организована рециркуляция водорода.

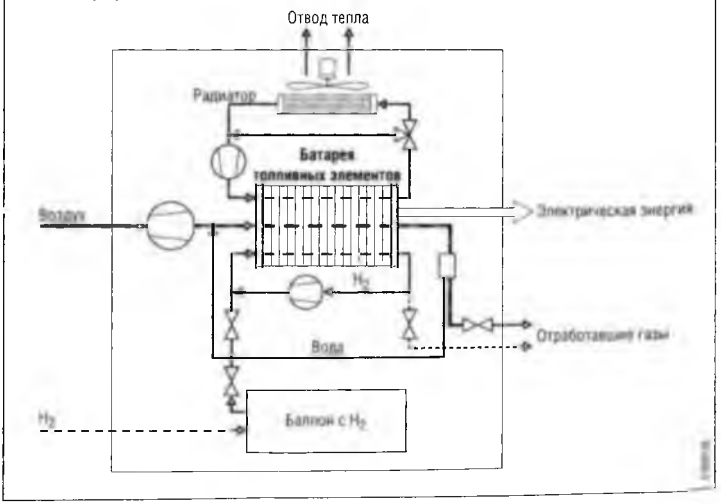
Разрушающие анод инородные газы на стороне анода непрерывно удаляются через электромагнитный спускной клапан. Это предотвращает накопление инородных газов, выходящих из баллона, или диффузионных газов (азота, водяных паров) со стороны катода. Клапан установлен на выпуске батареи, на стороне анода. Для слива избытка воды в тракте анода используется клапан, открытый при нулевом электрическом токе.

Водород, неизбежно выходящий во время слива воды, либо сильно разбавляется воздухом, либо каталитически преобразуется в воду.

Подача кислорода

Требуемый для электрохимической реакции кислород берется из окружающего воздуха. Необходимый массовый расход кислорода, составляющий, в зависимости от требуемой мощности батареи, до 100 г/с, подается ком-

Рис. 5. Электропривод с системой топливных элементов



прессором. Кислород сжимается компрессором максимум до 2,5 бар и подается на сторону катода топливного элемента. Давление в топливном элементе регулируется клапаном динамического регулирования давления, установленным в тракте выпуска отходящих газов на выходе топливного элемента.

Для обеспечения достаточного увлажнения полимерной мембраны, подаваемый в элемент воздух увлажняется либо при помощи дополнительной мембраны, либо путем впрыска сконденсированной воды.

Тепловой баланс

Электрический к.п.д. топливных элементов составляет приблизительно 50%. Другими словами, в процессе преобразования химической энергии генерируется приблизительно такое же количество тепловой энергии, что и количество электрической энергии. Это тепло необходимо рассеивать. Рабочая температура топливных элементов типа PEM составляет приблизительно 85 °C, что меньше температуры двигателей внутреннего сгорания. Несмотря на более высокий к.п.д., радиатор и вентилятор радиатора, при использовании на автомобиле топливных элементов, должны быть увеличены.

Поскольку используемая охлаждающая жидкость находится в прямом контакте с топливными элементами, она должна быть электрически непроводящей (деионизованной). Циркуляция охлаждающей жидкости обеспечивается электрическим насосом. Расход охлаждающей жидкости составляет до 12 000 л/ч. Клапан регулирования температуры распределяет поток охлаждающей жидкости между радиатором и перепускным каналом.

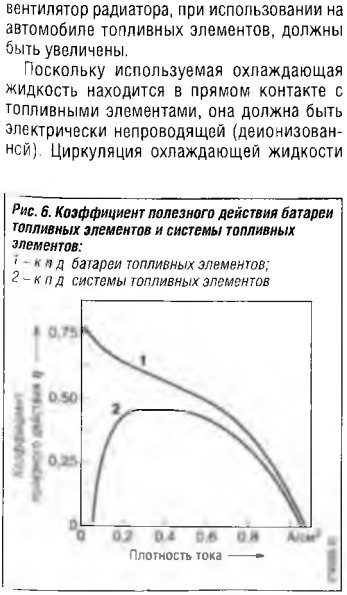
В системе используется охлаждающая жидкость, представляющая собой смесь деионизованной воды и этиленгликоля. Охлаждающую жидкость необходимо деионизировать на автомобиле. С этой целью она пропускается через ионообменник, заполненный специальной смолой, и очищается в процессе удаления ионов. Проводимость охлаждающей жидкости должна составлять менее 5 мкСм/см.

Коэффициент полезного действия системы топливных элементов

В дополнение к быстрой готовности батареи топливных элементов к отдаче энергии при большинстве оптимальных рабочих условий важно обеспечить высокий к.п.д. системы.

На рис. 6 приведено сравнение к.п.д. батареи топливных элементов с к.п.д. всей системы. Часть электроэнергии потребляется вспомогательными компонентами, такими как компрессор, что снижает общий к.п.д. системы. Тем не менее, системы топливных элементов обладают более высоким к.п.д., чем двигатели внутреннего сгорания, особенно при работе в диапазоне частичных нагрузок.

Рис. 6. Коэффициент полезного действия батареи топливных элементов и системы топливных элементов:
1 – к.п.д. батареи топливных элементов;
2 – к.п.д. системы топливных элементов



Безопасность

В целях обеспечения безопасности на автомобиле установлено несколько датчиков концентрации водорода. Водород представляет собой газ без цвета и запаха, который при объемной концентрации порядка 4% превращает воздух в горючую смесь. Датчики могут определять концентрацию водорода, начиная с 1%.

Принцип действий привода

Автомобили на топливных элементах представляют собой электромобили, в которых электроэнергия для питания электропривода генерируется системой топливных элементов.

По ряду причин целесообразно включить в систему тяговую аккумуляторную батарею:

- это позволяет запасать энергию во время рекуперативного торможения;
- это способствует повышению динамических характеристик привода;
- изменяя распределение нагрузки между системой топливных элементов и тяговой аккумуляторной батареей, можно еще более увеличить к.п.д. привода.

Поскольку тяговая аккумуляторная батарея является дополнительным источником энергии, такие автомобили известны под названием гибридизированных автомобилей на топливных элементах. Отношение мощности тяговой аккумуляторной батареи к общей мощности (степень гибридизации) варьируется в зависимости от применения системы.

Обычно в качестве основного источника энергии для привода используются системы топливных элементов. Такие автомобили известны под названием гибридных автомобилей на топливных элементах (FCHV). Обычно системы топливных элементов имеют номинальную мощность 60–100 кВт. Тяговые аккумуляторные батареи имеют номинальную мощность до 30 кВт при емкости 1–2 кВт ч.

В качестве альтернативного варианта тяговая аккумуляторная батарея может иметь значительно более высокую номинальную мощность и емкость и при необходимости заряжаться от системы топливных элементов. При этом достаточно иметь батарею топливных элементов с номинальной мощностью от 10 до 30 кВт. Автомобили с такой конфигурацией источников энергии известны по названием автомобилей на топливных элементах с расширенным диапазоном (FC-REX).

Распределение электроэнергии между системой топливных элементов, тяговой аккумуляторной батареей и электроприводом осуществляется одним или более преобразователями постоянного напряжения. Различные конфигу-

Рис. 7. Конфигурации преобразователей напряжения в системах привода на топливных элементах: *a – преобразователь постоянного напряжения тяговой аккумуляторной батареи; b – преобразователь постоянного напряжения батареи топливных элементов; c – конфигурация с двумя преобразователями постоянного напряжения*



рации таких преобразователей, выбор которых зависит от применения, показаны на рис. 7. В зависимости от конфигурации напряжение питания электропривода идентично напряжению одного из двух источников электроэнергии (см. рис. 7, a и 7, b), или изолировано от напряжения тяговой аккумуляторной батареи и батареи топливных элементов (см. рис. 7, c).

Электропривод

Система электропривода включает силовой электронный блок (преобразователь) и электродвигатель. Электродвигатель представляет собой синхронную или асинхронную электрическую машину, питание которой осуществляется от преобразователя таким образом, чтобы получить требуемый крутящий момент. Поскольку электропривод имеет высокую номинальную мощность (приблизительно 100 кВт), величина рабочего напряжения может достигать 450 В. В области автомобилестроения используются термины «высокое напряжение» и «электрическая система высокого напряжения». Электрическая система высокого напряжения изолирована от массы автомобиля.

Во время торможения автомобиля электродвигатель переходит в генераторный режим и генерирует электрический ток. Электроэнергия запасается в тяговой аккумуляторной батарее.

При помощи преобразователя высокое напряжение постоянного тока преобразуется в многофазное переменное напряжение, амплитуда которого регулируется в зависимости от требуемого крутящего момента. Как правило, используются преобразователи с выходными каскадами на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT).

Тяговая аккумуляторная батарея

В зависимости от степени гибридизации используются аккумуляторные батареии высокой емкости или высокой энергии с напряжением от 150 до 400 В. В качестве аккумуляторной батареи высокой емкости используются никель-металлгидридные или литий-ионные аккумуляторные батареи, в то время как в качестве аккумуляторных батарей высокой энергии - только литий-ионные аккумуляторы. Система мониторинга тяговой аккумуляторной батареи контролирует степень зарядки и емкость аккумуляторной батареи.

Преобразователь постоянного напряжения тяговой аккумуляторной батареи

Преобразователь постоянного напряжения тяговой аккумуляторной батареи осуществляет регулирование тока зарядки тяговой аккумуляторной батареи и выходного тока (до 300 А). Некоторые конфигурации системы позволяют обойтись без этого преобразователя.

Преобразователь постоянного напряжения батареи топливных элементов

Еще одним преобразователем постоянного напряжения является преобразователь напряжения батареи топливных элементов, осуществляющий регулирование выходного тока в пределах до 500 А. Некоторые конфигурации системы позволяют обойтись без этого преобразователя.

Преобразователь постоянного напряжения 12 В

Так же как на обычных автомобилях, на автомобилях на топливных элементах имеется электрическая система напряжением 12 В. Напряжение 12 В преобразуется из высокого напряжения. Для этой цели служит преобразователь постоянного напряжения, включенный между двумя системами. Из соображений безопасности этот преобразователь электрически изолирован. Он работает однонаправленно или двунаправленно и имеет номинальную мощность до 3 кВт.

Перспективы

Системы приводов на топливных элементах уже продемонстрировали свою пригодность в повседневной эксплуатации. Однако, для коммерческого использования в системах приводов автомобилей топливные элементы должны быть усовершенствованы в отношении экономичности и возможности серийного производства.

Упрощение системы дает снижение затрат и повышение надежности. Одним из направлений является разработка новых полимерных мембран для топливных элементов, не требующих увлажнения образующихся в ходе реакции газов и в то же время позволяющих повысить рабочую температуру.

Кроме того, необходимо значительно снизить стоимость всех компонентов. В этом отношении большой потенциал заключается в уменьшении количества платины в каталитическом слое топливного элемента.

Литература

[1] Pukrushpan, Stefanopoulou, Peng: Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design. Springer-Verlag, London, 2004.

Трансмиссия

Таблица 1. Величины и единицы измерения

Обозначение	Величина	Ед. измер.
a	Ускорение	м/с²
c_d	Коэффициент аэродинамического сопротивления	–
e	Коэффициент учета вращающихся масс	–
f	Коэффициент сопротивления качению	–
g	Ускорение свободного падения	м/с²
i	Передаточное число	–
m	Масса автомобиля	кг
n	Частота вращения	мин⁻¹
r	Динамический радиус шины	м
s	Коэффициент скольжения	–
v	Скорость движения автомобиля	м/с
A	Площадь наибольшего поперечного сечения	м²
D	Диаметр	м
I	Диапазон передаточных чисел	–
J	Момент инерции массы	кг · м²
M	Крутящий (вращающий) момент	Н · м
P	Мощность	кВт
α	Угол преодолеваемого подъема	°
φ	Коэффициент повышающей передачи	–
η	К.п.д.	–
λ	Коэффициент крутящего момента	–
μ	Коэффициент трансформации	–
ρ	Плотность	кг/м³
ω	Угловая скорость	рад/с
υ	Передаточное отношение	–

Индексы величин:

eff	– эффективная;	0	– относится к макс. мощности;
tot	– общая,		
hydr	– гидравлическая;	d1	– трансмиссия,
max	– максимальная;	G	– коробка передач
min	– минимальная;	P	– насос;
fd	– главная передача,	R	– реактор;
eng	– двигатель;	T	– турбина.

Назначение

Автомобильная трансмиссия создает тяговое усилие, необходимое для преодоления сопротивления движению. Химический (топливо) или электрический (гальванические батареи, солнечные элементы) вид энергии преобразуется в механическую энергию в силовом агрегате (двигатель внутреннего сгорания карбюраторного или дизельного типа, либо электрический двигатель), работающем в пределах определенного диапазона оборотов, ограниченного частотой холостого хода и максимальной частотой вращения коленчатого вала двигателя.

Расчет характеристик движения

Динамические характеристики автомобиля, описываемые уравнением тягового баланса, устанавливают равновесие между движущей силой и силами сопротивления движению.

Из уравнения тягового баланса рассчитываются ускорение, максимальная скорость движения, сопротивление подъему. Один из важных оценочных параметров коробки передач диапазон передаточных чисел равен:

$$I = \frac{(i/r)_{max}}{(i/r)_{min}} = \frac{\tan \alpha_{max} \cdot \upsilon_0}{(P/m\,g)_{eff}\ \varphi}$$

Коэффициент повышающей передачи φ определяется следующим образом:

$$\varphi = \frac{(i/r)_{min}}{\omega_0 \upsilon_0}$$

Вычисление эффективной удельной мощности базируется на значении мощности P, связанной с величиной тягового усилия (по-

Формула 1. Тяговый баланс между движущей силой и силами сопротивления движению

Данное уравнение устанавливает равенство между движущей силой и силами сопротивления движению, и может быть применено для нахождения различных величин, таких, как, например, ускорение, максимальная скорость движения, способность преодолевать подъемы и т. д.

Полезная мощность = сумме мощностей сопротивления на ведущих колесах (мощностной баланс).

$$M_{eng} \frac{i_{tot}}{r} \eta_{tot} = mgf\cos\alpha + mg\sin\alpha + em\dot{a} + c_d A \frac{\rho}{2} v^2$$

Движущая сила в зоне контакта шин	Сопротивление качению	Сопротивление подъему	Сопротивление разгону	Аэродинамическое сопротивление

При коэффициенте учета вращающихся масс $e = 1 + \frac{J}{m\,r^2}$

и моменте инерции масс $J = J_R + i_h^2 J_A + i_h^2 i_G^2 J_m$

лезная мощность двигателя минус мощность, затрачиваемая на привод вспомогательного оборудования, и потери мощности).

При $\varphi = 1$ диапазон передаточных чисел для легковых автомобилей равен 3...4, для грузовых автомобилей – 8...10. Поскольку коэффициент φ служит для определения относительных положений кривых сопротивления движению и выходной мощности двигателя во время работы на высших передачах, с его помощью можно также определить уровень эффективности работы двигателя.

При $\varphi > 1$ происходит смещение в неэффективный диапазон работы двигателя, но в то же время это создает запас для разгона и повышает тяговую способность автомобиля на подъемах на высших передачах. При $\varphi < 1$ улучшается топливная экономичность, однако только за счет значительно меньших ускорений и меньшего запаса тяговых свойств при движении на подъемах. Минимальный расход топлива достигается при оптимальном к.п.д. η_{opt}. При $\varphi > 1$ диапазон передаточных чисел уменьшается, при $\varphi < 1$ – возрастает.

Схемы трансмиссий

Изменяются в соответствии с расположением двигателя и ведущего моста.

Элементы трансмиссии

Должны удовлетворять основным требованиям, связанным с эксплуатацией автомобиля:

- обеспечение неподвижного состояния даже при работающем двигателе;
- осуществление перехода от неподвижного к подвижному состоянию;
- преобразование крутящего момента и скорости вращения;
- обеспечение прямого и обратного направлений движения;
- гарантирование того, что эксплуатационные режимы соответствуют минимальным расходу топлива и эмиссии вредных веществ в отработавших газах.

Таблица 2. Схемы трансмиссий

Схема привода	Расположение двигателя	Ведущий мост
Классическая	Переднее	Задний
Передне-приводная	Переднее, продольное или поперечное	Передний
Полноприводная	Переднее (заднее или центральное в отдельных случаях)	Передний и задний
Заднеприводная	Заднее	Задний

Рис. 1. Рабочая характеристика двигателя с кривыми сопротивления движению



Рис. 2. Тягово-скоростная характеристика автомобиля



Переход к движению и прерывание передачи крутящего момента выполняются с помощью сцепления. В целях компенсации разницы частот вращения валов двигателя и трансмиссии в сцеплении предусмотрено проскальзывание в тот момент, когда автомобиль начинает движение. Когда при изменении условий движения необходимо переключить передачу, сцепление отсоединяет вал двигателя от трансмиссии.

В автоматических трансмиссиях гидродинамическое сцепление или гидротрансформатор отвечают требованиям автоматического включения привода.

Трансмиссия изменяет крутящий момент двигателя с целью получения необходимых тяговых усилий автомобиля и поддержания мощности на сравнительно постоянном уровне.

Суммарное передаточное число трансмиссии обычно представляет собой произведение одного из передаточных чисел ступенчатой коробки передач и передаточного числа главной передачи.

Механические коробки передач обычно подразделяются на две категории: с цилиндрическими зубчатыми колесами, ручным переключением, ведомым (основным) и промежуточным валами либо с планетарным механизмом, характеризующимся переключением без разрыва потока мощности (в автоматических коробках передач). Коробка передач также предоставляет возможность выбора различных направлений вращения для прямого и обратного (задним ходом) режимов движения.

Дифференциал позволяет ведомым валам и колесам вращаться с различными угловыми скоростями во время совершения автомобилем поворота и распределяет подводимый к нему крутящий момент между колесами или мостами. Дифференциал повышенного трения реагирует на величину буксования одного из колес, передавая дополнительную мощность на отстающее колесо.

Для ослабления высокочастотных вибраций служат гасители крутильных колебаний, системы согласования масс и гидравлические элементы трансмиссии. Они позволяют защищать силовой агрегат от чрезмерных нагрузок и повышать комфортабельность движения путем уменьшения вибраций.

Сцепления и муфты

Сухое фрикционное сцепление

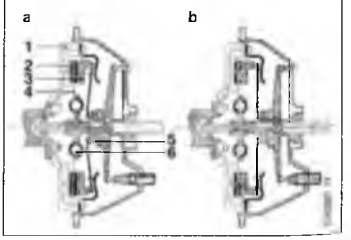
Состоит из нажимного диска с поверхностью трения, ведомого диска, имеющего фрикционные накладки, и второй поверхности трения, представленной маховиком двигателя. Маховик и нажимной диск непосредственно связаны с двигателем, а ведомый диск установлен на ведущем валу коробки передач.

Пружинный механизм, часто выполняемый в виде диафрагменной пружины, создает усилие, которое объединяет работу маховика, нажимного диска и ведомого диска с целью обеспечения их совместного вращения; в этом случае сцепление включается для передачи крутящего момента. Для выключения сцепления выжимной подшипник передает центру пружины определенное усилие, высвобождая, таким образом, усилие включения на периферии. Управление сцеплением осуществляется непосредственно под действием педали сцепления либо с помощью электрогидравлических или электромеханических элементов управления. Для поглощения колебаний дополнительно к ведомому диску может присоединяться одно- или многорежимный гаситель крутильных колебаний как с предварительным гасителем, так и без него.

Двухсекционный (сдвоенной массы) маховик имеет в качестве отличительной особенности упругий промежуточный элемент, который может быть установлен впереди сцепления для обеспечения максимального гашения колебаний.

Автоматическое сцепление позволяет осуществлять плавное троганье автомобиля с ме-

Рис. 3. Устройство сухого фрикционного сцепления: *a – сцепление выключено; b – сцепление включено. 1 – маховик двигателя; 2 – фрикционная накладка ведомого диска; 3 – нажимной диск; 4 – ведомый диск; 5 – выжимной подшипник, 6 – пружина демпфера*



ста, а также может применяться совместно с сервомеханизмом включения с целью обеспечения полностью автоматического переключения передач. К другим функциям автоматического сцепления можно отнести действия по управлению тяговым усилием во время ускорения автомобиля и по прерыванию потока мощности во время торможения. Также в процессе торможения возможны контроль силы тяги и отсоединения силовой передачи.

Фрикционное сцепление, работающее в масле

Преимущество мокрого фрикционного сцепления перед сухим состоит в обеспечении лучших тепловых характеристик, благодаря тому что масло активно способствует рассеиванию тепла. Однако, потери тяги у мокрого фрикционного сцепления во время отсоединения двигателя значительно выше, чем у сухого. Использование мокрого сцепления в сочетании с синхронизированными коробками передач представляет собой проблему из-за повышенной синхронной нагрузки во время переключения передач. Мокрые сцепления используются в легковых автомобилях, оснащенных трансмиссией с бесступенчатым изменением передаточного отношения.

Гидромуфты и гидротрансформаторы

Гидродинамические муфты и гидротрансформаторы служат для передачи крутящего момента двигателя посредством циркулирующей в их рабочей полости жидкости. Эти устройства, обеспечивающие компенсацию разности частот вращения двигателя и трансмиссии, идеально подходят для перехода от неподвижного состояния к движению. Гидротрансформатор также позволяет повышать крутящий момент. Насосное колесо гидротрансформатора преобразует механическую энергию, получаемую от силового агрегата, в гидравлическую энергию рабочей жидкости (ATF), а повторное преобразование обратно в механическую энергию происходит на лопастях турбинного колеса.

Входной крутящий момент насосного лопастного колеса (насоса) M_P и входная мощность насоса P_P подсчитываются следующим образом:

$$M_P = \lambda \rho D^5 \omega_P^2 , \quad P_P = \lambda \rho D^5 \omega_P^3 .$$

Где:

λ – коэффициент крутящего момента;

ρ – плотность среды (≈ 870 кг/м³ для рабочей жидкости);

D – наибольший диаметр круга циркуляции, м;

ω_P – угловая скорость насоса, рад/с.

Реактор, расположенный между насосом и турбиной, направляет жидкость снова ко входу в насос.

Отношение момента турбины МТ к моменту насоса МР называется коэффициентом трансформации: $\mu = -M_T / M_P$, который

Рис. 4. Сцепление со сдвоенной массой маховика:
1 – маховик сдвоенной массы; 2 – упругий элемент; 3 – нажимной диск; 4 – диафрагменная пружина; 5 – ведомый диск; 6 – выжимной подшипник

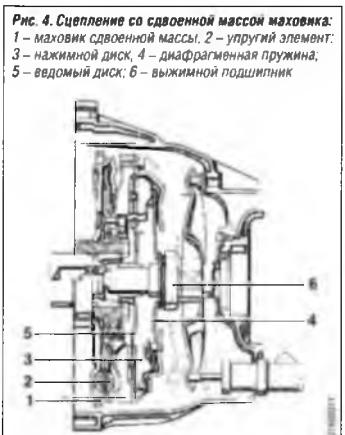
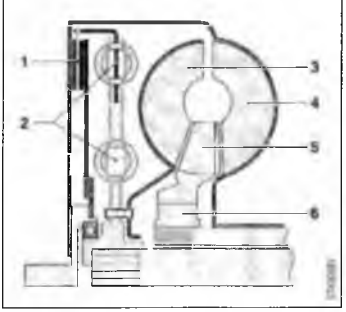


Рис. 5 Гидротрансформатор с блокировочной муфтой (радиальное сечение):
1 – блокировочная муфта; 2 – пружина демпфера, 3 – турбина; 4 – насос; 5 – реактор, 6 – механизм свободного хода



возрастает в функции отношения частот вращения насоса и турбины.

Передаточное отношение определяется отношением угловой скорости турбины к угловой скорости насоса: $\nu = \omega_T/\omega_P$; от этого параметра зависят как коэффициент момента λ, так и коэффициент трансформации μ.

Рис. 6. Разрез гидротрансформатора с блокировочной муфтой и пружиной демпфера:
1 – пружина демпфера; 2 – блокировочная муфта, 3 – турбина; 4 – насос, 5 – реактор; 6 – механизм свободного хода

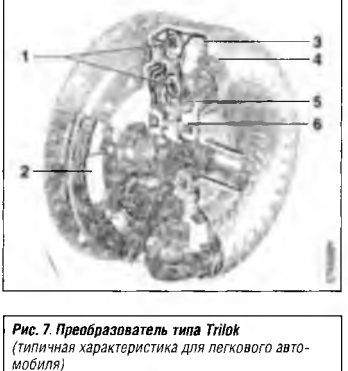
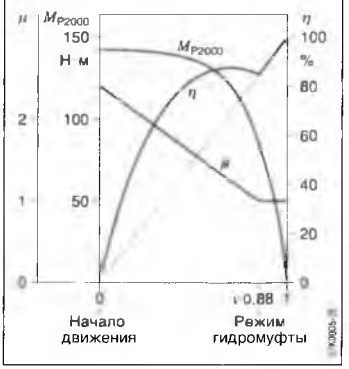


Рис. 7. Преобразователь типа Trilok
(типичная характеристика для легкового автомобиля)
$M_{P2,000} = M_P$ *при* $n = 2{,}000$ *мин*$^{-1}$



Коэффициент скольжения $s = 1 - \nu$ и коэффициент трансформации определяют гидравлический к. п. д.:

$$\eta_{hydr} = \mu\,(1 - s) = \mu\,\nu.$$

Максимальное увеличение крутящего момента происходит при $\nu = 0$, то есть при остановленной турбине (стоповый режим). Повышение частоты вращения турбины фактически сопровождается линейным уменьшением коэффициента трансформации до тех пор, пока не достигается режим с соотношением моментов 1:1. Реактор, связанный с неподвижным корпусом через механизм свободного хода, начинает свободно вращаться в потоке жидкости.

Двухфазный преобразователь крутящего момента Феттингера с центростремительной турбиной (преобразователь типа Trilok) является стандартом для применения в автомобиле. Геометрическая схема размещения лопастей этого агрегата выбирается с целью обеспечить коэффициент трансформации 1,7–2,5 на стоповом режиме ($\nu = 0$) (рис. 7). Кривая гидравлического к.п.д. $\eta_{hydr} = \nu \cdot \mu$ в диапазоне преобразования является близкой к параболической. За режимом гидромуфты, который характеризуется скольжением 10...15%, к.п.д. соответствует передаточному отклонению n и достигает 97% при высоких угловых скоростях двигателя.

Гидротрансформатор обеспечивает бесступенчатое изменение величины крутящего момента, демпфирование крутильных колебаний, поглощение пиковых значений моментов и передачу мощности фактически без какого-либо заметного износа.

Диапазон преобразования и к.п.д. гидротрансформаторов не являются достаточными для применения их на транспортных средствах. Эти устройства могут обеспечивать экономичный режим работы только при использовании вместе с многоступенчатыми или бесступенчатыми коробками передач; однако работа с неполным включением (скольжением) приводит к снижению к.п. д.

Блокировочная муфта

Обеспечивает фрикционную связь между насосом и турбиной с целью избежать потерь к.п.д, связанных со скольжением. Она имеет поршень со специальной поверхностью трения; все это подсоединено к ступице турбины через гаситель крутильных колебаний.

Многоступенчатые коробки передач

Многоступенчатые коробки передач являются общепринятым средством силовой передачи в автомобиле. К основным причинам их успешного применения относятся высокий к.п.д., зависящий от количества передач и характеристик крутящего момента двигателя, хорошая приспосабливаемость к получению различных тяговых усилий на ведущих колесах при эффективной работе двигателя и простота конструкции.

Переключение передач в многоступенчатой коробке осуществляется путем соединения или разъединения силовой трансмиссии при помощи скользящих или фрикционных муфт. Первые относятся к неавтоматическим и полуавтоматическим коробкам передач, вторые – к автоматической трансмиссии.

Коробки с механическим переключением передач, применяемые в легковых автомобилях и в большинстве грузовых автомобилей небольшой грузоподъемности, чаще всего, бывают двухвальными – с основным и промежуточным валами. Трансмиссии грузовых автомобилей большой грузоподъемности иногда включают два или даже три промежуточных вала. В этом случае требуются специальные конструктивные решения для обеспечения плавного подвода мощности ко всем промежуточным валам.

Автоматические коробки передач для легковых и грузовых автомобилей, как правило, являются планетарными шестеренчатыми передачами и только в редких случаях используются конструкции с промежуточными валами. В планетарных передачах часто используются планетарные механизмы Равино и Симпсона.

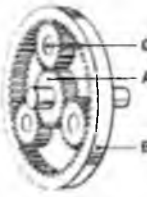
Механизмы планетарных передач

Базовый планетарный механизм состоит из солнечного зубчатого колеса, коронного зубчатого колеса и водила с сателлитами. Каждый из этих элементов может быть соединен с ведущим или ведомым валами либо находиться в неподвижном состоянии. Соосная компоновочная схема трех элементов делает этот тип агрегата идеальным для использования вместе с фрикционными сцеплениями и ленточными тормозами, применяемыми для выборочного включения и торможения отдельных элементов. Схема соединения может изменяться без прерывания потока действующего крутящего момента; такая способность учитывается при создании автоматических коробок передач.

Поскольку действующие силы распределены среди нескольких сателлитов, нахо-

Рис. 8. Планетарный механизм с различными передаточными числами:
A – солнечное зубчатое колесо; B – коронное зубчатое колесо; C – сателлит

Основное уравнение для планетарного механизма $n_A + (Z_B/Z_A)\, n_B - (1 + Z_B/Z_A)\, n_C = 0$



Вход	Выход	Остановлено	Передаточное число	Примечание
A	C	B	$i = 1 + Z_B/Z_A$	$2{,}5 \le i \le 5$
B	C	A	$i = 1 + Z_A/Z_B$	$1{,}25 \le i \le 1{,}67$
C	A	B	$i = \dfrac{1}{1 + Z_B/Z_A}$	$0{,}2 \le i \le 0{,}4$ повышающие передачи
C	B	A	$i = \dfrac{1}{1 + Z_A/Z_B}$	$0{,}6 \le i \le 0{,}8$ повышающие передачи
A	B	C	$i = -Z_B/Z_A$	передачи заднего хода $-4 \le i \le -1{,}5$
B	A	C	$i = -Z_A/Z_B$	передачи заднего хода $-0{,}67 \le i \le -0{,}25$

дящихся в одновременном параллельном зацеплении, размеры коробки остаются компактными. Такой механизм не имеет радиальных сил на опорах, поэтому он наиболее подходит для передачи больших крутящих моментов. К.п.д. такой передачи является относительно высоким.

Механические коробки передач

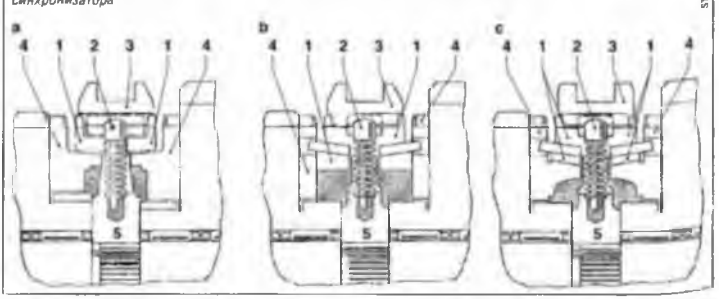
Основные элементы механической коробки передач:

- одно- или многодисковое сухое сцепление для отключения или включения трансмиссии; привод сцепления может быть снабжен усилителем;
- агрегат коробки передач, характеризующийся зубчатыми передачами постоянного зацепления;
- механизм переключения с рычагом переключения передач.

Усилие, затрачиваемое при выборе передачи, передается посредством тяги переключения передачи или троса на зубчатые муфты или муфты с синхронизатором, которые соединяют шестерни с валами. Перед включением передачи необходимо синхронизировать частоту вращения соединяемых элементов коробки передач. В том случае, когда в коробке передач применена зубчатая муфта (такой тип переключения иногда еще встречается в коробках передач грузовых автомобилей большой грузоподъемности), водитель переключает передачи путем двойного выключения сцепления как для повышения, так и для понижения передачи: в последнем случае это сопровождается использованием педали подачи топлива.

Практически во всех коробках передач легковых автомобилей и в большей части коробок грузовых автомобилей используются синхронизаторы. Они состоят из фрикцион-

Рис. 9. Механизм переключения передач с синхронизатором
a – с одинарным конусом; b – с двойным конусом; c – с тройным конусом; 1 –кольцо синхронизатора; 2 – подпружиненный фиксатор, 3 – муфта переключения передач, 4 – зубчатый венец, 5 – ступица синхронизатора



ной муфты, предназначенной для уравнивания угловых скоростей муфты и зубчатого венца включаемой шестерни, и механизма блокировки для предотвращения соединения шестерни с валом до завершения процесса синхронизации. В основном, использует одноконусные синхронизаторы. В случае, когда возникает необходимость уменьшения усилий переключения передачи, применяются сдвоенные или даже строенные конусные синхронизаторы.

Коробки передач в легковых автомобилях имеют 5 или (в некоторых случаях) 6 ступеней (рис. 10).

Диапазон передаточных чисел находится приблизительно в пределах от 4,0 до 5,5 в зависимости от количества передаточных чисел и зубчатых пар. Конструкции коробок передач видоизменяются в соответствии с компоновочной схемой автомобиля.

Ведущий и ведомый валы могут быть соосны (в трехвальных коробках) или параллельны (в двухвальных коробках); в единый блок также могут входить главная передача и дифференциал.

Коробки передач грузовых автомобилей могут иметь от 4 до 16 передач в зависимости от типа автомобиля и особенностей эксплуатации. Коробки с числом передач от 4 до 6, как правило, имеют одноагрегатную конструкцию; диапазон передаточных чисел такой коробки находится в пределах от 4 до 9. Дополнительная коробка с пневматическим управлением применяется с целью получения до 9 ступеней переключений передач; диапазон коробки при этом увеличивается до 13.

Для получения большого числа передач применяют, помимо основной коробки передач, демультипликатор и делитель. Диапазон передаточных чисел достигает 16.

Рис. 11. Конструкция механической коробки передач:
а – с параллельным расположением ведущего и ведомого валов; b – с расположением ведущего и ведомого валов на одной оси. Цифры обозначают передачи

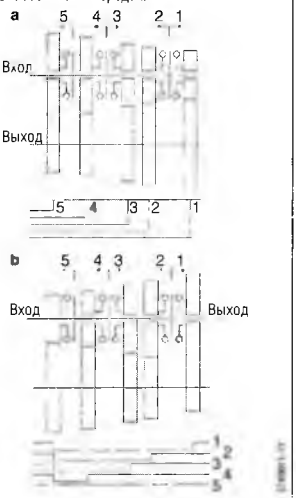
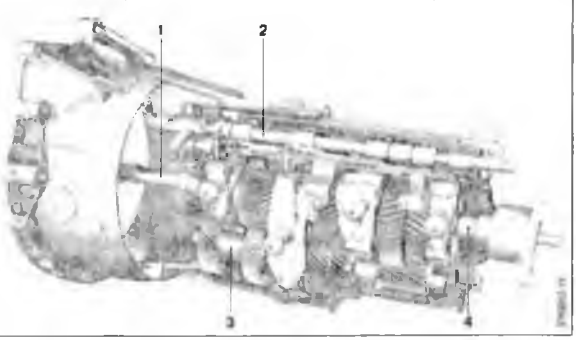


Рис. 10. 6-ступенчатая механическая коробка передач легкового автомобиля со стандартной (соосной) схемой (ZF S6-37):
1 – ведущий вал;
2 – шток вилки включения передач;
3 – промежуточный вал;
4 – ведомый вал



Отбор мощности (вспомогательные приводы)

Применяется в грузовых автомобилях для работы вспомогательного оборудования. В основном коробки отбора мощности приводятся от ведомого диска сцепления и от двигателя. Выбор зависит от конкретных условий применения.

Замедлители

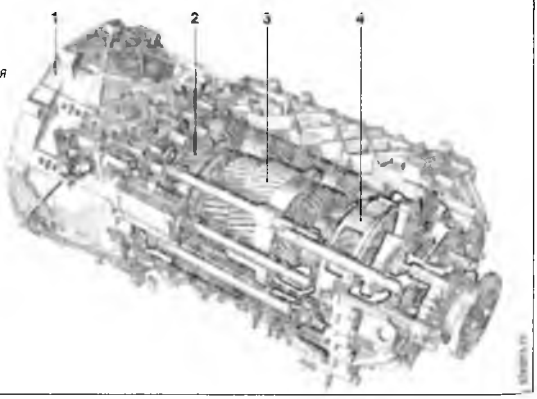
Гидродинамические или электродинамические замедлители являются неизнашиваемыми вспомогательными тормозами, уменьшающими тепловую нагрузку на колесные тормоза во время длительных замедлений. Они могут устанавливаться со стороны ведущего вала привода (первичные встроенные замедлители) или со стороны ведомого вала (вторичные встроенные замедлители), либо размещаться отдельным блоком между вторичным валом коробки передач и ведущим мостом. Преимущества объединенных конструкций – компактные размеры, небольшой вес и использование единой рабочей и смазывающей жидкости. Преимущества первичных замедлителей проявляются при торможениях на небольших скоростях, поэтому они широко применяются на городских автобусах. Вторичные замедлители имеют преимущества при использовании на тяжелых грузовых автомобилях для согласованного торможения на более высоких скоростях и при движении на спусках.

Автоматические коробки передач

Существуют два типа автоматических трансмиссий (коробок передач), отличаемых по эффективности воздействия на динамику управления автомобилем:

- полуавтоматические трансмиссии, являющиеся ручными коробками передач, с помощью которых все управляющие операции выполняются водителем, а переключение передач осуществляется путем электронно-управляемых исполнительных механизмов; с точки зрения динамики автомобиля это означает, что переключение передач всегда связано с прерыванием потока мощности при помощи сцепления;
- полностью автоматические трансмиссии, которые обеспечивают переключение передач при нагрузке, то есть, мощность продолжает передаваться к ведущим колесам во время переключения передач.

Рис. 12.16 ступенчатая коробка передач с демультипликатором тяжелого грузового автомобиля (ZF Ecosplit 16 S221):
1 – колокол сцепления;
2 – делитель;
3 – синхронизированная основная 4-ступенчатая коробка передач;
4 – демультипликатор



Такое отличие в динамике управления автомобилем является важным фактором, определяющим область применения для этих двух видов трансмиссии. Полностью автоматические трансмиссии используются при условиях, когда разъединение силовой передачи приводит к значительному уменьшению комфорта движения (прежде всего, при управлении легковым автомобилем с высокой приемистостью), или когда это недопустимо при сложных режимах движения (при управлении внедорожным транспортным средством). Полуавтоматические трансмиссии находят применение на тяжелых грузовых автомобилях, междугородных автобусах, а также небольших легковых автомобилях, гоночных и спортивных легковых автомобилях.

Полуавтоматические коробки передач

Недостаток этих коробок передач с ручным выбором передач, применяемых, в основном, на грузовых автомобилях, по отношению к полностью автоматическим заключается в том, что каждое переключение связано с прерыванием потока мощности. Однако, у такой конструкции имеются также важные преимущества, позволяющие: создавать небольшие промежутки между передаточными числами, вплоть до 16 передач; передавать мощность с повышенной эффективностью (к.п. д.); повышать экономичность; использовать одну и ту же базовую коробку передач для конструкций неавтоматического и автоматического типов.

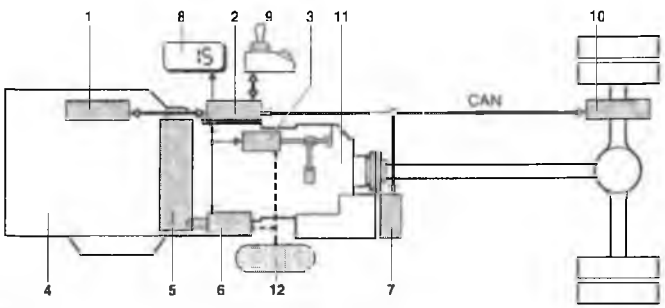
Принцип действия

Центральный клапанный блок коробки передач преобразует электрические сигналы в пневматическое или гидравлическое давление, воздействующее на гидро- или пневмоцилиндр переключения передач. В зависимости от используемой системы, электрически управляемые сигналы могут непосредственно поступать от рычага переключения передач, приводимого в действие водителем, или от электронной системы управления.

Конструктивные особенности

На большинстве полуавтоматических коробок передач имеет место дистанционное

Рис. 13. Полуавтоматическая трансмиссия (схема):
1 – электронный блок двигателя; 2 – электронный блок трансмиссии; 3 – механизм управления коробкой передач; 4 – дизельный двигатель; 5 – сухое однодисковое сцепление; 6 – привод сцепления; 7 – блок управления замедлителем; 8 – дисплей; 9 – рычаг переключения передач; 10 – электронный блок системы ABS/TCS; 11 – коробка передач; 12 – пневмоцилиндр;
—— электрическая связь, – – – – пневматическая связь, ═══ бортовой контроллер связи (CAN)



управление механическим режимом переключения передач; процедуры переключения передач и выключения сцепления – те же, что и при использовании стандартной неавтоматически переключаемой коробки передач.

К преимуществам таких коробок передач относятся: уменьшенное усилие, образуемое во время переключения передач; упрощенная схема переключения; защита двигателя от работы на повышенных оборотах без нагрузки.

На полностью автоматических коробках передач, кроме самой коробки, автоматическим является и механизм переключения передач. Управляющее устройство, имеющееся в распоряжении водителя, состоит либо из специального рычага переключения, либо из кнопок +/– с возможностью перехода на режим ручного выбора передач. Сложные системы переключения применяются при управлении коробками передач с большим количеством передаточных чисел. Система, в которой используется включение передач только в соответствии с фиксированной программой, далеко не всегда является оптимальной, поскольку при ее использовании не учитывается весь комплекс условий, связанных с достижением оптимального равновесия между управляемостью автомобиля и его топливной экономичностью. Эта задача возлагается на микрокомпьютерную систему управления. Электронная система управления работой двигателя регулирует открытие дроссельной заслонки (система ETC или EGAS), облегчая, таким образом, достижение эффективной синхронизации с процессом переключения передач. К преимуществам такого управления относятся: достижение оптимальной экономии топлива; уменьшение нагрузки на водителя во время работы; меньше вес и размеры; повышение безопасности для водителя и для автомобиля.

Рис. 14. 8-ступенчатая автоматическая коробка передач легкового автомобиля (ZF 8 HP70):
A, B – многодисковые тормоза; C, D, E – многодисковые фрикционы; P1… P4 – планетарные механизмы; GWK – блокировочная муфта гидротрансформатора с контролем проскальзывания





Передача	Многодисковый фрикцион		Многодисковый тормоз			Передаточное число *i*
	A	B	C	D	E	
1	●	●	●			4,714
2	●	●			●	3,140
3		●	●		●	2,106
4		●		●	●	1,667
5		●	●	●		1,285
6			●	●	●	1,000
7	●		●	●		0,839
8	●			●	●	0,667
R	●	●		●		–3,317

Полностью автоматические коробки передач
Выполняют операции по переключению передач без участия водителя. Потери мощности в автоматической коробке передач существенно больше, чем в механической. Однако это компенсируется преимуществами, связанными с возможностью поддержания работы двигателя в максимально экономичном режиме. Автоматическая коробка передач содержит:

- гидротрансформатор (всегда используется в коробках передач легковых автомобилей; на грузовых автомобилях обычно применяется конструкция типа Trilok): предназначен для троганья с места, увеличения крутящего момента и поглощения крутильных колебаний;
- в коробках передач легковых автомобилей (как правило) и грузовых автомобилей (всегда) гидротрансформатор дополняется блокировочной муфтой;
- несколько планетарных механизмов;
- многодисковые фрикционы с гидравлическим приводом, дисковые или ленточные тормоза (предназначены для выполнения переключений без разрыва потока мощности);
- механизмы свободного хода вместе с элементами переключения для оптимального переключения передач;
- механизм планетарной передачи;
- систему управления для выбора и плавного переключения передач в соответствии с программой, устанавливаемой водителем автомобиля;
- гидронасос с приводом от двигателя, который обеспечивает давление, необходимое для работы элементов переключения, подает жидкость к гидротрансформатору, обеспечивает смазку и охлаждение коробки передач.

Варианты конструкции
Автоматические коробки передач, устанавливаемые на легковых автомобилях, имеют до 8 передач переднего хода.

Диапазон механического преобразования находится в пределах от 3,5 (4-ступенчатая коробка передач) до 5,0 (5-ступенчатый агрегат), до 6 (6- и 7-ступенчатая коробка), до 7 (8-ступенчатая коробка). Коэффициент трансформации при разгоне изменяется в пределах от 1,7 до 2, 5.

Автоматические коробки передач для грузовых автомобилей могут иметь от 3 до 6 передач переднего хода. Диапазон механического преобразования изменяется в пределах от 2 до 8. Эти коробки передач часто имеют встроенные гидродинамические замедлители, а также гидронасос, большой поддон для накопления жидкости и охладитель жидкости.

В качестве альтернативы автоматической коробки передач гидротрансформаторного типа все шире на переднеприводных и спортивных автомобилях применяются автоматические трансмиссии с двойным сцеплением или автоматизированные механические коробки передач (рис. 16). Трансмиссии с двойным сцеплением имеют преимущество над гидротансформаторами в условиях высоких значений частоты вращения коленчатого вала – от 6500 до 7000 мин$^{-1}$. Кроме того, благодаря наличию промежуточного вала, трансмиссия с двойным сцеплением может иметь преимущества в конфигурации привода (масса, объем). В настоящее время в серийное производство внедрены 6- и 7-ступенчатые трансмиссии с двойным сцеплением «мокрого» типа. Также серийно выпускаются версии с «сухим» сцеплением и электромеханическим приводом.

Рис. 15. Принципиальная схема трансмиссии с двойным сцеплением



Электронная система управления коробкой передач

Системы управления автоматических коробок передач, в которых применяется только гидравлика, вытесняются системами, в которых сочетаются элементы электроники и гидравлики (гидравлический привод сохраняется только применительно к фрикционам). К преимуществам применения электроники относятся: возможность устанавливать несколько различных программ переключения передач, большая плавность включения передачи, гибкость и приспосабливаемость к различным типам автомобилей, применение упрощенных гидравлических цепей управления и механизмов свободного хода.

Измерительные преобразователи системы определяют нагрузку, положение рычага переключения передач, положение переключателя программ и режима «kick-down», а также частоту вращения вала двигателя и ведомого вала коробки передач. Блок управления обрабатывает эти данные в соответствии с установленной программой и вырабатывает сигналы управления коробкой передач.

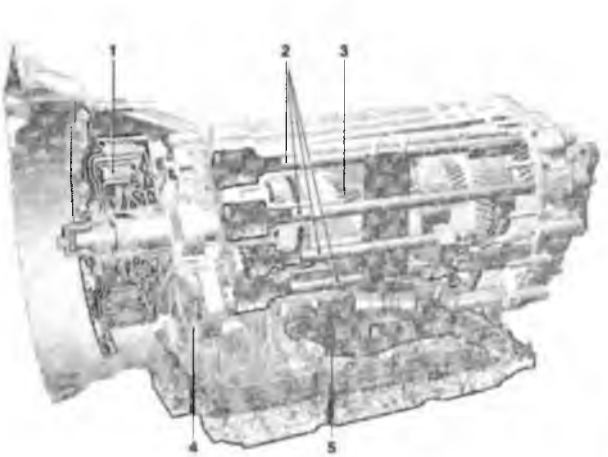
Электродинамические преобразователи образуют связь между электронными и гидравлическими цепями, в то время как соленоидные клапаны приводят в действие фрикционы. Используются аналоговые или цифровые регуляторы давления.

Управление переключением передач

Во время выбора необходимой передачи системой запрашиваются данные о частоте вращения ведомого вала коробки передач и двигателя, прежде чем сработает соответствующий соленоидный клапан. Водитель может выбрать из имеющихся требуемую программу переключения передач, например, для обеспечения максимальной топливной экономичности или максимального скоростного режима. В процесс переключения передач можно также в любой момент вмешаться посредством ручного переключения передач рычагом.

Интеллектуальные программы переключения передач оптимизируют управление автомобилем, пополняя стандартные данные управления коробкой передач вспомогательными параметрами, такими, как продольное и поперечное ускорение и скорость перемещения

Рис. 16. 7-ступенчатая трансмиссия с двойным сцеплением (ZF 7DT50):
1– «мокрое» двоиное сцепление; 2 – штоки вилок включения синхронизированных передач, 3–7-ступенчатая промежуточная трансмиссия; 4 – привод масляного насоса, 5 – электрогидравлическое управление переключением передач



педалей тормоза и подачи топлива. Сложная программа управления позволяет выбирать соответствующую передачу как для текущих условий движения автомобиля, так и для стиля управления. Широкое распространение получили концепции, в которых сочетаются высокий уровень «интеллектуальных» (универсальных) программ переключения передач со средствами активной адаптации к индивидуальному управлению автомобилем.

В дополнение к стандартным положениям переключений рычаг переключения передач может переходить ко второй (параллельной) логической схеме, при которой простого легкого перемещения рычага толчком достаточно для того, чтобы немедленно изменить передачу (если при этом не будет превышена частота вращения вала двигателя).

Блокировка гидротрансформатора

Механическая блокировочная муфта может использоваться для повышения эффективности работы коробки передач за счет устранения проскальзывания в гидротрансформаторе. Переменными параметрами, используемыми для определения условий срабатывания блокировки гидротрансформатора, являются нагрузка на двигатель и частота вращения ведомого вала коробки передач.

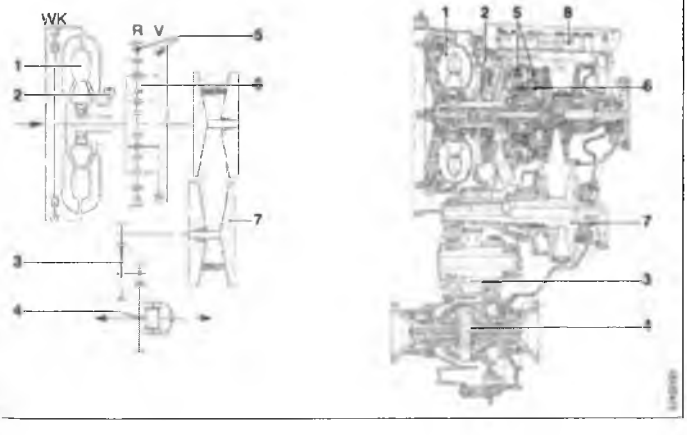
Контроль качества переключения

Точность, с которой давление во фрикционных элементах регулируется в зависимости от величины передаваемого крутящего момента, оказывает решающее влияние на качество переключения; это давление устанавливается с помощью специального регулятора. Плавность переключения передач может повышаться за счет кратковременного снижения выходной мощности двигателя на период переключения передачи.

Защитные цепи

Предусмотрены для исключения повреждений коробки передач, связанных с ошибкой водителя, при этом система на ошибочные функции в электрической схеме срабатывает посредством возвращения к запасному режиму.

Рис. 17. Бесступенчатая коробка передач легкового автомобиля (ZF CFT23):
a – принципиальная схема; b – конструкция; 1 – гидротрансформатор; 2 – насос; 3 – редуктор с постоянным передаточным отношением, 4 – дифференциал; 5 – элементы переключения, 6 – реверс-редуктор, 7 – клиновидный ремень, 8 – электрогидравлическое управление переключением передач, WK – блокирующая фрикционная муфта гидротрансформатора; R – реверс; V – движение вперед



Конечные элементы управления
Элементы электрогидравлического преобразования, такие как соленоидные клапаны и регуляторы давления, обеспечивают связь между электронными схемами и гидравлическими цепями.

Бесступенчатые коробки передач

Позволяют оптимально сочетать характеристики двигателя с различными режимами эксплуатации автомобиля.

К их преимуществам перед механическими коробками передач с фиксированным количеством передаточных чисел относятся возможности повышения производительности и топливной экономичности с одновременным уменьшением выброса токсичных веществ в отработавших газах (посредством обеспечения оптимальных условий работы двигателя). Однако полная реализация преимуществ бесступенчатой передачи повлечет за собой уменьшение коэффициента ускоряющей передачи до значения φ, равного 0,5 или 1,0.

Бесступенчатые передачи (CVT) могут быть механическими (ременными или фрикционными), гидравлическими или электрическими. Наивысший уровень разработок достигнут применительно к механическим бесступенчатым передачам, в которых используется стальной гибкий ремень (устанавливаются на маломощных переднеприводных легковых автомобилях с поперечным расположением двигателя).

Диапазон преобразования бесступенчатой передачи находится в пределах 5,5–6,0. Сегодня серийно выпускаются бесступенчатые трансмиссии, у которых передаваемый крутящий момент от двигателя колеблется между 300 и 350 Н м. Основными элементами бесступенчатой коробки передач легкового автомобиля являются:

- механизм включения для начала движения (фрикцион с дисками в масле, электромагнитная муфта или гидротрансформатор);
- первичный и вторичный шкивы с аксиально перемещаемыми дисками и стальной ремень, предназначенный для передачи мощности;
- система электронно-гидравлического управления коробкой передач;
- узел движения задним ходом;
- главная передача с дифференциалом.

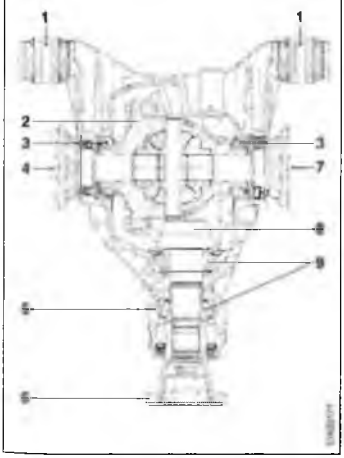
Можно ожидать, что бесступенчатые трансмиссии со стальными ремнями в недалеком будущем будут использоваться шире, в частности, внедряться на более мощные легковые автомобили.

В настоящее время в производстве автомобилей пока еще не используются фрикционно-роликовые трансмиссии. С точки зрения компоновочной схемы они лучше подходят для транспортных средств с приводом на задние колеса.

На некоторых средствах общественного транспорта применяются электрические трансмиссии. Они могут приводиться от альтернативных источников питания, таких как аккумуляторные батареи, навесные линии электропередач или, в будущем, топливные элементы. К преимуществам электрических трансмиссий, применяемых на автобусах, относятся неинтегрированная конструкция силовой передачи, одноколесный привод и, в особенности, более простая реализация конструкции транспортного средства с низким уровнем пола.

Гидростатико-механические трансмиссии в настоящее время используются при производстве сельскохозяйственных тракторов. Применение их на транспортных средствах, движущихся по дорогам, нежелательно из-за высоких уровней шума, создаваемых такой трансмиссией.

Рис. 18. Главная передача заднего моста легкового автомобиля:
1 – эластомерная опора; 2 – дифференциал; 3 – подшипник дифференциала; 4 – фланец полуоси; 5 – картер (состоящий из двух частей); 6 – фланец карданного вала; 7 – фланец полуоси; 8 – коническая зубчатая передача; 9 – подшипники конической зубчатой передачи



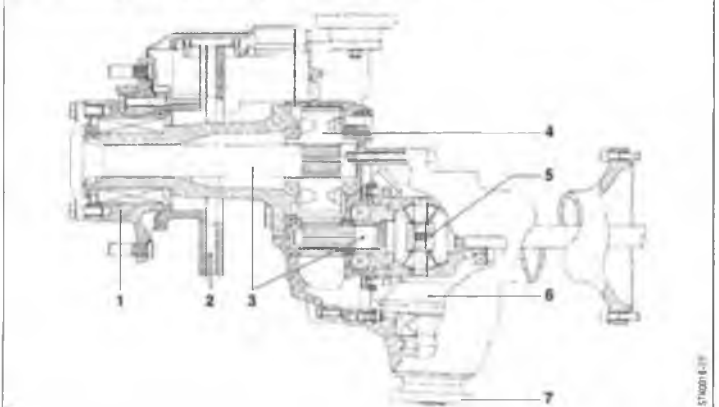
Главная передача

Суммарное передаточное число трансмиссии обеспечивают следующие элементы: коробка передач с несколькими постоянными передаточными числами (автоматическая или неавтоматическая), дополнительная коробка передач (например, раздаточная коробка полноприводного автомобиля) и главная передача.

Между коробкой передач и главной передачей в заднеприводном автомобиле расположена карданная передача (однозвенная или с несколькими валами и промежуточными опорами). Универсальные шарниры, шарниры равных угловых скоростей или упругие муфты компенсируют угловые перемещения валов агрегатов трансмиссии.

В легковых автомобилях главная передача состоит из ведущего и ведомого зубчатых колес – гипоидных (при продольном расположении двигателя) или цилиндрических (при поперечном расположении двигателя). Главная передача может быть конструктивно объединена с дифференциалом (на автомобилях с приводом на задние колеса и полным приводом) или с дифференциалом и коробкой передач (на переднеприводных автомобилях).

Рис. 19. Главная передача автобуса (ZF AV132):
1 – ступица колеса; 2 – дисковый тормоз; 3 – ось; 4 – бортовой редуктор; 5 – дифференциал; 6 – коническая зубчатая передача; 7 – фланец карданного вала



Основными элементами главной передачи и дифференциала являются ведущая и ведомая шестерни, планетарная передача, подшипники, полуоси, фланцы полуосей и картер дифференциала. Передаточное число главной передачи обычно находится в диапазоне между 2,6:1 и 4,5:1.

Ведомая шестерня главной передачи обычно крепится болтами к картеру дифференциала, в котором располагаются планетарная передача и ведомая шестерня, выполненная заодно с валом, установленным на двух конических роликовых подшипниках. Для уменьшения шума главная передача прикрепляется к раме транспортного средства посредством упругих (резиновых) опор.

Кроме крутящего момента, механического к.п.д. и массы, решающим критерием при современном производстве автомобилей становится уровень шума, вызываемого главной передачей. Бесшумность механизма, главным образом, зависит от способа производства ведущей и ведомой шестерен. Для снижения шума, помимо стандартной технологии изготовления шестерен, могут применяться методы финишной тепловой обработки зубьев (закалка с поверхностным упрочнением), благодаря которым устраняются неточности обработки (с получением максимально возможного соответствия между расчетной топографией профиля зуба и действительной геометрией, нарезаемой на станке).

На грузовых автомобилях обычно используются главные передачи с коническими гипоидными зубчатыми шестернями. Передаточное отношение главной передачи обычно изменяется в диапазоне от 3:1 до 6:1. На автомобилях, для которых большое значение имеют характеристики плавности хода, например, на автобусах, шестерни главной передачи изготавливаются со шлифованными зубьями.

На городских автобусах, которые в настоящее время, как правило, имеют конструкцию с низким расположением пола, используется разнесенная главная передача с цилиндрическими бортовыми редукторами.

Для увеличения дорожного просвета (например, у транспортных средств, используемых на строительных площадках), применяются разнесенные главные передачи с планетарными бортовыми редукторами, которые позволяют уменьшить размеры главной передачи и валов полуосей.

Дифференциал

Служит для распределения крутящего момента между колесами или мостами и позволяет ведомым валам вращаться с неодинаковыми угловыми скоростями.

За редким исключением, дифференциал состоит из конических зубчатых колес. Если шестерни слева и справа – одинаковых размеров, дифференциал осуществляет равное распределение крутящего момента на левое и правое колеса. При различных коэффициентах сцепления левых и правых шин с дорожным покрытием сохраняется равенство моментов на левой и правой шине. При этом шина с меньшим коэффициентом сцепления начинает буксовать.

Дифференциал повышенного трения (LSD) позволяет устранить этот нежелательный эффект посредством использования фрикционных дисков, фрикционных конусов, самоблокирующихся зубчатых передач или многодисковых муфт, находящихся в высоковязкой жидкостной среде.

Дифференциал повышенного трения может иметь электронное управление для работы в широком диапазоне эксплуатационных условий. Высокий коэффициент блокировки, характерный при трогании автомобиля с места, может уменьшаться при возрастании частоты вращения или при достижении предельной величины силы тяги. Включаемая водителем блокировка дифференциала может использоваться при специ-



Рис. 20. Принципиальная схема дифференциала:
1 – ведущая шестерня; 2 – коронная шестерня; 3 – корпус дифференциала; 4 – шестерни дифференциала

фических условиях движения (например, во время движения по бездорожью).

Самоблокирующиеся дифференциалы, в которых автоматически действует устройство, препятствующее относительному вращению ведомых звеньев, постепенно вытесняются электронными системами, например, системой контроля тягового усилия (TCS). Такая система обеспечивает замедление проворачивания колеса посредством использования тормоза – когда мощность продолжает передаваться от трансмиссии к притормаживаемому колесу.

Полноприводный автомобиль

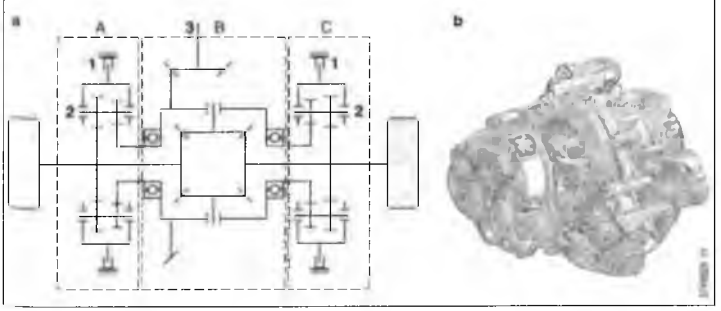
Компоновочная схема с приводом на все колеса улучшает тяговое усилие легковых автомобилей, внедорожных транспортных средств и грузовых автомобилей на мокрых и скользких дорожных покрытиях и неровной местности.

У автомобиля с постоянным полным приводом и распределением крутящего момента поровну между ведущими осями используется конический дифференциал или планетарный механизм. Распределение крутящего момента изменяется с помощью автоматических или управляемых дифференциалов повышенного трения.

Управление полным приводом (с жестким приводом на передний и задний мосты, вязкостной муфтой или раздаточной коробкой) включает блокировку дифференциала в главной передаче и раздаточной коробке (имеющей пониженную передачу для движения на крутых уклонах, при низких скоростях и для передачи высоких крутящих моментов).

Вязкостная муфта (герметизированный многодисковый механизм с высоковязкой кремнийорганической жидкостью) либо дифференциал Torsen представляют собой еще одно средство приведения в действие привода на все колеса. Как только предельное тяговое усилие на постоянно подключенном мосту превышается, муфта, реагируя на

Рис. 21. Разнесенная главная передача с планетарными колесными редукторами:
a – принципиальная схема; b – конструкция; A – планетарный колесный редуктор; B – дифференциал; C – планетарный колесный редуктор; 1 – многодисковый тормоз; 2 – планетарная передача; 3 – ведущая шестерня

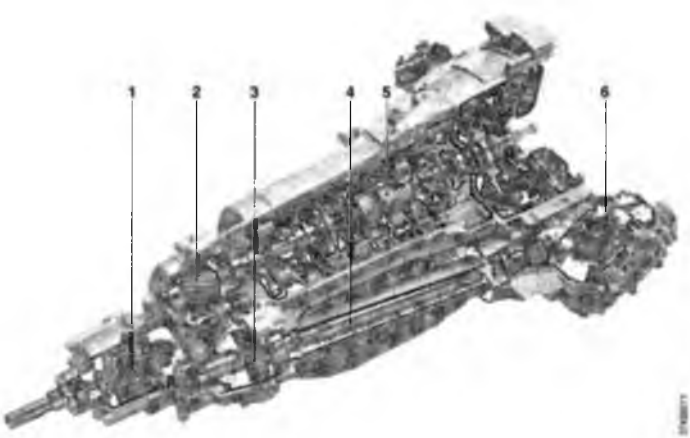


увеличение проскальзывания, начинает передавать крутящий момент ко второму ведущему мосту.

Передача полного привода может осуществляться дополнительным узлом в автоматической трансмиссии. Интеграция такого узла (рис. 22) позволяет уменьшить объем занимаемого пространства, стоимость и массу трансмиссии.

На более поздних автомобилях стали применяться дополнительные блокировки дифференциала в раздаточной коробке, осуществляемые в соответствии с интеллектуально контролируемым функционированием тормозов.

Рис. 22. Автоматическая трансмиссия легкового автомобиля с интегрированным полным приводом (ZZ 8 HP):
1 – дифференциал Torsen; 2 – зубчатая передача привода автоматической коробки передач; 3 – зубчатая передача привода передней оси; 4 – вал привода передней оси; 5 – автоматическая коробка передач; 6 – привод передней оси с дифференциалом



Системы шасси

Базовые принципы

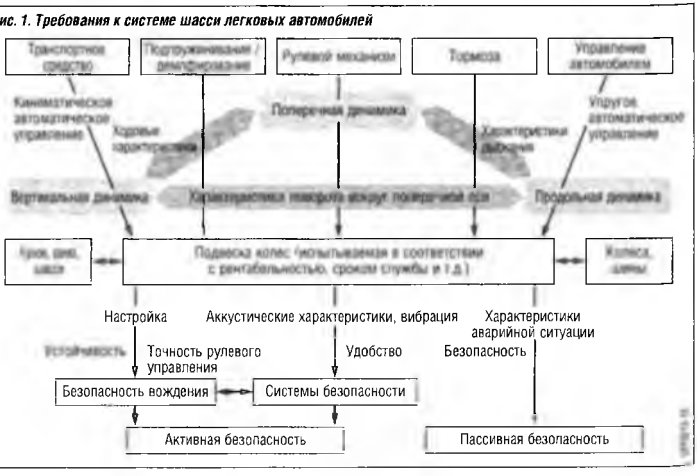
Дороги, обычно используемые автмобилями, имеют неровности в диапазоне частот приблизительно до 30 Гц и являются наиболее интенсивным источником возбуждения в автомобиле. Возбуждения приводят к вертикальным перемещениям (вертикальному ускорению) автомобиля и пассажиров. Промежуточным звеном между поверхностью дороги и автомобилем является система шасси, главная задача которой – передача энергии между окружающей средой и кузовом. Это означает, что и на динамические характеристики автомобиля, и на безопасность дорожного движения, а также на комфорт сильно влияет выбор системы шасси.

Однако динамика реакции автомобиля определяется не только компонентами системы шасси, она скорее является результатом сочетания различных общих параметров автомобиля. Как правило, повлиять на динамику автомобиля за счет работы над шасси оказывается весьма сложной задачей, в частности из-за того, что эффект изменений параметров должен преобладать среди конфликтующих приоритетов – безопасности движения и комфортабельности езды.

Безопасность движения в решающей мере зависит от контактных взаимодействий между шинами и поверхностью дороги, и стало быть от передаваемых продольных и поперечных сил. Поэтому фундаментальной целью при конфигурировании системы шасси в плане безопасности движения всегда является минимизация динамический колебаний нагрузки на колёса, вызывающих снижение величину передаваемой силы.

С другой стороны, комфортабельность езды зависит от перемещений и ускорений, воздействующих на пассажиров (прежде всего, в вертикальном направлении). В зависимости от области применения комфорт имеет большую важность и ни в коем случае не должен рассматриваться как сопутствующий элемент развития системы. В частности, в случае с профессиональными водителями, достаточно высокий уровень комфорта им необходим для предотвращения вреда здоровью. В этом контексте хорошим параметром оценки зарекомендовала себя эффективная величина ускорения кузова.

Рис. 1. Требования к системе шасси легковых автомобилей



Однако эти ключевые параметры изначально лишь описывают потенциал системы шасси для соблюдения соответствующих требований. Фактическая динамика автомобиля, безопасность движения и комфорт также сильно зависят от выбора параметров дорожного покрытия (среды) и внутренних регулируемых переменных (например, угла поворота рулевого колеса или положения педали акселератора), задаваемых водителем. Фундаментальные требования к системе шасси показаны на рис. 1 [1]. Шасси как система (без электроники) традиционно подразделяется на следующие подсистемы:

- подвеска автомобиля;
- амортизаторы;
- подвеска колес и рычаги подвески;
- шины;
- рулевое управление;
- тормозная система.

Возбуждение, вызываемое дорогой

Прежде чем изложить основные принципы отдельных компонентов «шасси» как системы, мы сперва обсудим понятие возбуждения, вызываемого дорогой, и затем – эффект возбуждения на вибрацию системы «автомобиль» в целом. Наряду с адаптацией системы колебаний к внешним возбуждениям, вызываемым дорогой, для автомобилей также требуется свести к минимуму влияние внутренних источников возбуждения на характеристики вибрации (ДВС, колеса и шины) [2].

Знание и описание в виде оптимизируемых параметров возбуждения, являющегося причиной вибраций, требуется для изучения характеристик вибрации и настройки системы подвески и амортизаторов в системе шасси. В то время как небольшие неровности можно скомпенсировать смягчающими характеристиками шин, для уменьшения более значительных перемещений кузова между кузовом и колесами необходим элемент, изменяющий свою длину. Здесь наиболее часто используются стальные пружины, обеспечивающие возвращающую силу, зависящую от изменения длины. Результат – с учетом массы колес и кузова – система, способная вибрировать и требующая дополнительных элементов для гашения колебаний.

Виды неровностей

Описывая неровности на дороге в зависимости от пути или времени, мы различаем гармонические (синусоидальные), периодические и стохастические неровности (рис. 2).

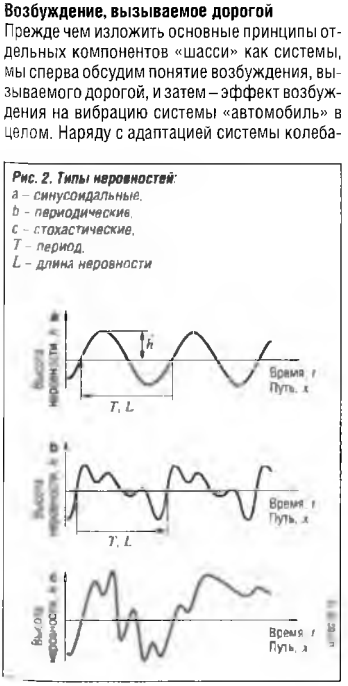


Рис. 2. Типы неровностей:
a – синусоидальные,
b – периодические,
c – стохастические,
T – период,
L – длина неровности

Гармонические неровности:
В этом случае (рис. 2, a), высота неровности h в зависимости от пройденного пути x или момента времени t будет равна:

$$h(x) = \hat{h}\sin(\Omega x + \varepsilon) \qquad \text{(уравнение 1)},$$

$$h(t) = \hat{h}\sin(\omega t + \varepsilon) \qquad \text{(уравнение 2)},$$

где:
$\hat{h}$ – амплитуда;
L – длина неровности;
v – скорость;
ε – сдвиг фазы;
$\Omega = 2\pi/L$ – дорожная частота;
$\omega = v\,\Omega = 2\pi\, v/L$ – угловая частота.

Периодические неровности:
На следующем этапе предполагаются не только чисто синусоидальные, но также и периодические неровности (рис. 2, в). Это означает, что выражение зависимости в виде ряда Фурье (периодические функции можно описать как бесконечный ряд синусоидальных колебаний) будет иметь вид:

$$h(x) = h_0 + \sum_{k=1}^{\infty} h_k \sin(\Omega x + \varepsilon_k)$$ (уравнение 3),

$$h(t) = h_0 + \sum_{k=1}^{\infty} h_k \sin(\omega t + \varepsilon_k)$$ (уравнение 4),

где:
h_0 – базовая амплитуда;
h_k – амплитуда;
ε_k – сдвиг фазы;
$\Omega = 2\pi/L$ – дорожная частота;
L – длина неровности.

Стохастические участки неровности:
Для поверхностей реальных дорог, т.е. не только для периодических, но и случайных (стохастических) неровностей (рис. 2, с), высота неровности определяется через интеграл, соответственно перемещаясь из дискретного в непрерывный спектр [2]:

$$h(x) = \int_{-\infty} \underline{h}(\Omega)\, e^{j\Omega x} d\Omega$$ (уравнение 5),

с непрерывным амплитудным спектром:

$$\underline{h}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty} h(x)\, e^{-j\Omega x} dx$$ (уравнение 6),

или в диапазоне времени:

$$h(t) = \int_{-\infty} \underline{h}(\omega)\, e^{j\omega t} d\omega$$ (уравнение 7),

где

$$\underline{h}(\omega) = \frac{1}{v}\, \underline{h}(\Omega)$$ (уравнение 8).

Спектральная плотность мощности неровностей дороги
Но как правило, неровность в зависимости от пути или времени меньше подходит для теоретических исследований возбуждения, вызываемого дорогой. Значительно более интересным представляется знание среднестатистического возбуждения, возникающего при езде по определенному дорожному покрытию, в частности, в сравнении с разными покрытиями. Вот почему для оценки возбуждения в основном используется спектральная плотность мощности $\Phi_h(\Omega)$ в зависимости от дорожной частоты и спектральная плотность мощности в зависимости от угловой частоты $\Phi_h(\omega)$. Математическое определение и подробное обсуждение этих переменных здесь не приводятся. См. [1, 2]. Для следующего исследования достаточно описательного значения спектральной плотности мощности, существующей в «энергии в бесконечно малом диапазоне частот» (относительно пути или времени) или «выхода мощности в диапазоне собственной частоты».

Учитывая $L = v\,T$, $\Phi_h(\Omega)$ и $\Phi_h(\omega)$ могут быть преобразованы друг в друга. Это можно описать уравнением:

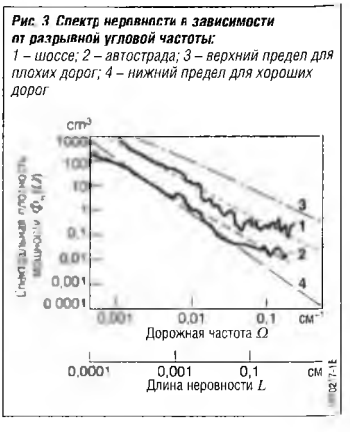
$$\Phi_h(\omega) = \frac{1}{v}\, \Phi_h(\Omega)$$ (уравнение 9).

Спектральная плотность мощности определяет распределение мощности спектра возбуждения по всему спектру неровностей. Обычно это представляют на двойной логарифмической шкале (рис. 3). Приближение участков спектральной плотности мощности на реальных дорожных покрытиях возможно здесь с прямыми линиями, как это видно в следующем уравнении:

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w}$$ (уравнение 10)

где:

Рис. 3. Спектр неровности в зависимости от разрывной угловой частоты:
1 – шоссе; 2 – автострада; 3 – верхний предел для плохих дорог; 4 – нижний предел для хороших дорог



$\Phi_h(\Omega_0)$ – спектральная плотность мощности с опорной угловой частотой Ω_0 (как правило, $\Omega_0 = 1$ м$^{-1}$, что соответствует опорной длине волны неровности $L_0 = 2\pi/\Omega_0 = 6{,}28$ м);
w – волнистость поверхности дороги (от 1,7 до 3,3; для стандартных дорог $w = 2$).

Если степень неровности и волнистость поверхности дороги известны, то все параметры в приведенном выше линейном уравнении заданы, и тогда его можно использовать для характеристики различных типов поверхности дороги. Степень неровности определяется как спектральная плотность мощности при опорной угловой частоте, т.е. $\Phi_h(\Omega_0)$.

Основные принципы вибрационных характеристик автомобилей

Создаваемые дорогой возбуждения воздействуют на кузов автомобиля через шины, подвеску колес и систему подвески / амортизаторов. Для теоретического анализа можно использовать вибрационные модели различной сложности. С ростом сложности модели повышается количество степеней свободы и связанных дифференциальных уравнений. Для большей ясности фундаментальные взаимосвязи в автомобильных вибрационных системах будут разъяснены на примере двухмассового вибратора (рис. 4). Более подробную информацию можно найти в [1], [2] и [3].

С указанием значений массы, коэффициентов упругости и коэффициентов затухания все параметры в двухмассовой модели для технического анализа вибраций заданы, и с переменными, обозначенными на рис. 4, можно составить два дифференциальных уравнения:

$$m_A \ddot{z}_A + k_{A,R}(\dot{z}_A - \dot{z}_R) + c_{A,R}(z_A - z_R) = 0$$
(уравнение 11, а),

$$m_R \ddot{z}_R - k_{A,R}(\dot{z}_A - \dot{z}_R) - c_{A,R}(z_A - z_R) + c_R z_R + k_R \dot{z}_R = c_R h + k_R \dot{h}$$
(уравнение 11, в).

Деление уравнений 11, а и 11, в на массу в каждом случае приводит к обычному виду дифференциального уравнения 2-го порядка и дает угловую частоту свободных затухающих колебаний ω_g и угловую частоту свободных незатухающих колебаний ω_u, а также коэффициенты затухания для колеса D_R и кузова D_A.

Нижеследующее уравнение применимо к угловой частоте независимых незатухающих колебаний колеса:

$$\omega_R = \sqrt{\frac{c_R + c_{A,R}}{m_R}} \approx \sqrt{\frac{c_{A,R}}{m_R}} \quad (\text{при } c_R \sim 10\, c_A)$$
(уравнение 12).

Нижеследующее уравнение применимо, соответственно, к кузову:

$$\omega_A = \sqrt{\frac{c_{A,R}}{m_A}}$$
(уравнение 13).

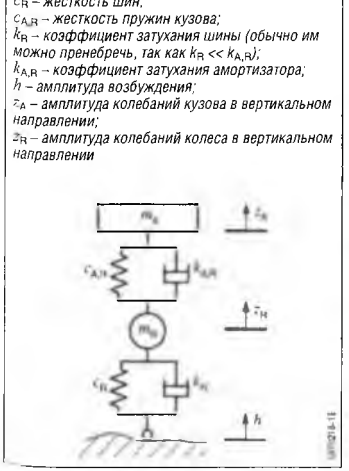
Вообще, угловая частота свободных затухающих колебаний ω_g вычисляется по формуле:

$$\omega_g = \omega_u \sqrt{1 - D^2}$$
(уравнение 14),

где в качестве приближения предполагается следующее:

$$\omega_g \approx 0{,}9\, \omega_u.$$

Рис. 4. Двухмассовый вибратор в качестве модели четверти автомобиля:
m_R – масса колеса, включая компоненты, которые также вибрируют (тормоз, пропорциональная осевая масса и т.д.);
m_A – масса кузова, поддерживаемая колесом;
c_R – жесткость шин;
$c_{A,R}$ – жесткость пружин кузова;
k_R – коэффициент затухания шины (обычно им можно пренебречь, так как $k_R << k_{A,R}$);
$k_{A,R}$ – коэффициент затухания амортизатора;
h – амплитуда возбуждения;
z_A – амплитуда колебаний кузова в вертикальном направлении;
z_R – амплитуда колебаний колеса в вертикальном направлении



Нижеследующее уравнение применимо к коэффициенту затухания D_R на колесе:

$$D_R = \frac{k_{A,R}}{2m_R\omega_R} = \frac{k_{A,R}}{2\sqrt{(c_R + c_{A,R})m_R}} = \frac{m_A\omega_A}{m_R\omega_R} D_A \quad \text{(уравнение 15)},$$

где опыт показал, что нужно ориентироваться на $D_R \approx 0{,}4$. То же самое применимо к кузову:

$$D_A = \frac{k_{A,R}}{2m_A\omega_A} = \frac{k_{A,R}}{2\sqrt{(c_{A,R}m_R)}} \quad \text{(уравнение 16)}.$$

В этом случае эффективность доказало значение $D_A \approx 0{,}3$. Колебания динамической нагрузки на колесо ΔG приводят к равенству:

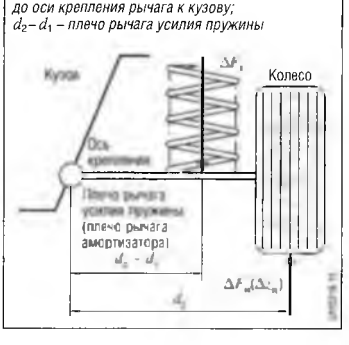
$$\Delta G = m_R\ddot{z}_R + m_A\ddot{z}_A = c_R(h - z_R) + k_R(\dot{h} - \dot{z}_R) \quad \text{(уравнение 17)}.$$

Вместе эти переменные образуют основу для грубой конфигурации системы подвески / амортизаторов автомобиля.

Если известны собственная частота кузова (обычно $f_A \approx 1$ Гц) и масса кузова (или удельная масса кузова на колесо), то можно определить жесткость пружин кузова относительно колес:

$$c_{A,R} = \omega_A^2 m_A \quad \text{(уравнение 18)}.$$

Рис. 5. Жесткость пружины:
ΔF_F – *фактическое усилие пружины;*
ΔF_R – *усилие на колесо;*
Δz_R – *степень сжатия пружины;*
d_2 – *расстояние от центральной плоскости колеса до оси крепления рычага к кузову;*
$d_2 - d_1$ – *плечо рычага усилия пружины*



Преобразование в фактическую жесткость пружин кузова имеет место с учетом соотношения i между перемещениями колеса и пружины, см. рис. 5. Прежде всего, фактическое усилие пружины

$$\Delta F_F = c_A \Delta z_F \quad \text{(уравнение 19)}$$

и усилие колеса ΔF_R формулируются со сжатием пружины Δz_R. Нижеследующее уравнение применимо к ΔF_R:

$$\Delta F_R = c_{A,R}\Delta z_R \quad \text{(уравнение 20)}.$$

Равновесие крутящего момента, действующего вокруг крепления рычага подвески к кузову оси, показанного на рис. 5 приводит к:

$$c_{A,R}\Delta z_R d_2 = c_A \Delta z_F (d_2 - d_1) \quad \text{(уравнение 21)}.$$

Это уравнение можно использовать для преобразования фактической жесткости пружины c_A в соответствии с геометрическими взаимосвязями с жесткостью колеса $c_{A,R}$:

$$c_{A,R} = c_A i^2 \quad \text{(уравнение 22)}$$

с жесткостью пружины i

$$i = \frac{(d_2 - d_1)}{d_2} = \frac{\Delta z_F}{\Delta z_R} \quad \text{(уравнение 23)}.$$

То же самое справедливо для гасителя вибраций. Для расчета коэффициента затухания вибраций кузова (его эффект на колесо), в отношении колеса применимо следующее выражение, в соответствии с уравнением 16:

$$k_{A,R} = 2D_A\sqrt{c_{A,R}m_R} \quad \text{(уравнение 24)}.$$

При $D_A = 0{,}3$ (см. выше) и m_A, как известной переменной изучаемого автомобиля, коэффициент затухания вибраций кузова можно определить с учетом уравнения 23.

Таблица 1. Эффект влияния системы подвески / амортизаторов на характеристики вертикальных колебаний автомобиля

	Параметры конструкции	Эффект в низкочастотном диапазоне (собственная частота кузова)	Эффект в среднечастотном диапазоне	Эффект в высокочастотном диапазоне (собственная частота осей)
Параметры кузова	Жесткость пружины	Собственная частота и ускорение кузова радикально падают при уменьшении жесткости пружины	При уменьшении жесткости пружины ускорение кузова слегка падает	При уменьшении жесткости пружины ускорение кузова остается практически постоянным
	Степень демпфирования	При уменьшении степени демпфирования ускорение кузова резко возрастает	При уменьшении степени демпфирования ускорение кузова резко падает	При уменьшении степени демпфирования колебание динамической нагрузки на колесо резко возрастает
Параметры шин	Жесткость	Собственная частота и амплитуда остаются примерно постоянными		Собственная частота и амплитуда ускорения кузова и колебания нагрузки на колесо падают приблизительно пропорционально уменьшению вертикальной жесткости шин
	Степень демпфирования	Собственная частота и амплитуда остаются примерно постоянными		Амплитуда ускорения кузова и колебания нагрузки на колесо немного уменьшаются с ростом степени демпфирования при постоянной собственной частоте колеса

С помощью уравнения 15

$$D_R = \frac{m_A \omega_A}{m_R \omega_R} D_A$$

оценка оптимальных соотношений между массами колеса и кузова с помощью коэффициентов затухания $D_R = 0{,}4$ и $D_A = 0{,}3$ (ориентиры) дает следующее соотношение:

$$\frac{m_A}{m_R} = \frac{0{,}4\,\omega_R}{0{,}3\,\omega_A} = \frac{0{,}4 f_R}{0{,}3 f_A} \qquad \text{(уравнение 25)},$$

где $f_R = \omega_R/2\pi$ и $f_A = \omega_A/2\pi$. При $f_R = 12$ Гц и $f_A = 1$ Гц результат будет следующий

$$m_R = \frac{1}{10} m_A$$

Влияние различных параметров подвески/амортизаторов на разные диапазоны частоты показано в таблице 1.

Передаточная функция и спектральная плотность мощности ускорения кузова и колебаний нагрузки на колесо

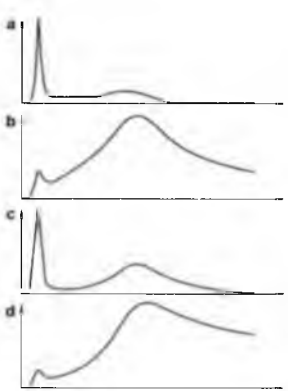
Уравнения 11, a и 11, в можно использовать для расчета передаточных функций (функций увеличения). Сумма передаточной функции - это отношение амплитуды выходных переменных (ускорения кузова или колебаний нагрузки на колесо) и амплитуды входной переменной (вертикальное возбуждение, см. рис. 4). Принцип прогрессии показан на рис. 6, c и 6, d.

Теперь эти передаточные функции нужно привязать к неровностям дороги. Для этого предположим, что распределение неровностей дороги является функцией дорожной частоты (рис. 7, a), и дорожная частота на основе скорости движения v (рис. 7, b) преобразуется в угловую частоту, зависящую от времени (рис. 7, c). На рис. 7, c видно, что амплитуды возбуждения на низких частотах значительно больше, чем на высоких. Передаточные функции для ускорения кузова (рис. 6, c) и колебаний нагрузки на колесо (рис. 6, d) возводятся в квадрат и умножаются на этот спектр возбуждения. В результате получаем

спектральную плотность мощности для ускорения кузова (рис. 6, a) и колебаний нагрузки на колесо (рис. 6, b) [2].

Более высокие амплитуды возбуждения поверхности дороги при низких частотах увеличивают амплитуду вибрации в диапазоне частоты собственных колебаний кузова (1–2 Гц). Однако в диапазоне частоты собственных колебаний колеса (10–14 Гц) низкие амплитуды неровностей приводят к падению спектральных плотностей мощности по сравнению с передаточными функциями, а это значит, что движения кузова становятся более доминирующими, чем движения осей.

Рис. 6. Передаточная функция и спектральная плотность мощности ускорения кузова и колебаний нагрузки на колесо
(согласно [2]):
a – спектральная плотность мощности, ускорение кузова,
b – спектральная плотность мощности, колебания нагрузки на колесо;
c – сумма передаточной функции, ускорение кузова,
d – сумма передаточной функции, колебания нагрузки на колесо

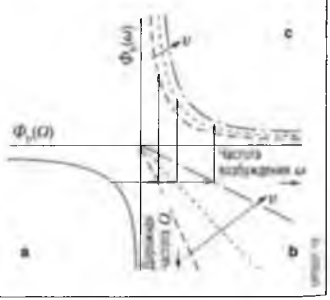


Квантификация вибраций автомобиля

Почти сразу после появления автомобиля, в начале 20-го века были разработаны подходы к квантификации комфортабельности езды. Очень быстро было обнаружено влияние комфорта – в частности, в случае с профессиональными водителями – на хорошее физическое и психическое состояние, а также на здоровье водителя и, стало быть, на общую безопасность дорожного движения. Соответственно, были предприняты попытки вывести переменные, описывающие комфорт, и сравнить их в виде объективных коэффициентов комфорта для различных типов автомобилей и дорог. С тех пор был определен целый ряд различных методов оценки, основанных почти исключительно на сигналах ускорения в районе сиденья водителя и вокруг него. Здесь учитывается частотно-зависимая чувствительность людей к вибрациям и колебаниям, возникающим в различных положениях, имеющим различный характер и направленность (поступательная или вращательная; направления x, y, z) посредством соответствующих взвешивающих частотных фильтров.

Широко используются два подхода – Директива VDI 2057 [4] и стандарт ISO 2631 [9]. Эти методы анализа, несмотря на относительно низкие затраты по сравнению с другими, имеют большое информативное значение. В то же время, они образуют основу для многих других подходов к оценке комфорта, разработанных в 90-е годы и позднее (см. [4], [5], [6], [7]). В используемых до сих пор методах

Рис. 7. Взаимосвязь между спектральными плотностями в зависимости от времени и дорожных частот



ускорения, вызываемые возбуждением в различных точках измерения (положениях инициации), обычно служат для определения коэффициента общего комфорта (например, на основе нескольких частичных коэффициентов комфорта в различных точках измерения), т.е. измерения нагрузки на пассажиров. Ускорения являются прежде всего частотно-взвешиваемыми (т.е. амплитуды различных частот привязаны к частотно-зависимым коэффициентам) и впоследствии приводятся к какому-то значению, например, по методу среднеквадратических значений RMS (см. [4]) в соответствии со следующим уравнением:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)\,dt} \qquad \text{(уравнение 26)}$$

или по методу среднеквадратических значений RMQ (корень четвертой степени, см. [6]) в соответствии со следующим уравнением:

$$a_{RMQ} = \sqrt[4]{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^4(t)\,dt} \qquad \text{(уравнение 27).}$$

В зависимости от количества оцениваемых точек измерения в последующей операции должен формироваться общий коэффициент. Для Директивы VDI 2057 имеет отношение только оценка точки измерения с наибольшей нагрузкой. Все поступательные ускорения этого положения инициации (рука, сиденье или нога) в одинаковой мере учитываются в расчете коэффициента. Однако для взвешивания отдельных положений инициации пока не разработано никаких единых спецификаций. Причина этого кроется в том, что многие общие условия предметных испытаний определяли правило суммирования для общего коэффициента комфорта, образуемого из частичных коэффициентов комфорта, сильно отличавшихся друг от друга.

Для обеспечения сопоставимости коэффициентов отдельных методов расчета общий коэффициент комфорта часто стандартизируется по стандартной шкале VDI. В то же время, объективным коэффициентам присваиваются вербализованные уровни интенсивности нагрузки (в помощь оценке предметов испытаний).

Разница между отдельными методами оценки комфорта (см. [4], [5], [6], [7]) кроется в основном в количестве оцениваемых точек измерения, в спецификации расчета для образования частичного коэффициента комфорта из сигнала временного ускорения (метод RMS и RMQ) и, наконец, в рассеянном взвешивании различных сигналов ускорения при слиянии для образования общего коэффициента комфорта. К тому же еще окончательно не прояснён вопрос касательно частотного взвешивающего фильтра, используемого в зависимости от точки измерения. Функции взвешивания частоты, большинство из которых определены эмпирическим путем, сильно отличаются друг от друга, особенно в низкочастотных диапазонах (ниже 1 Гц).

Эксперты также критикуют тот факт, что при группировании различных типов ускорения и направлений для образования отдельного коэффициента комфорта происходит потеря информации. Это означает, что при определенных обстоятельствах такие эффекты, как рост одного частичного коэффициента с одновременным уменьшением других частичных коэффициентов в одной и той же точке измерения (например, другого направления) и результирующее компенсаторное влияние на общий показатель комфорта останутся невыявленными. Этого можно избежать путем оценки временных прогрессий частотно-оцениваемых ускорений непосредственно перед образованием частичного показателя комфорта.

Меры по минимизации вибрации

Создаваемые дорогой возбуждения приводят к вибрации осей и кузова автомобиля. Ее следует избегать путем минимизации колебаний динамической нагрузки на колесо (безопасность движения) и ускорений кузова (комфортабельность езды). Они уменьшаются с помощью соответствующих компонентов в подвеске колеса, при этом в зависимости от области применения свою эффективность доказали различные системы подвески, амортизации и рычагов.

Для решения этих задач традиционно используются пружины и амортизаторы кузова. В сочетании с кинематикой и эластокинематикой в подвеске колес, настраиваемыми в соответствии с потребностями, они призваны обеспечить оптимальную передачу сил между шинами и дорожным покрытием и, одновременно, высокий уровень комфорта.

Однако с распространением актюаторов в системах шасси (например, рулевое управление с наложением или векторизация крутящего момента) возрастает важность затрат на оптимизацию подсистем. Одной из наиболее важных причин этого является рост добавочной стоимости продукта из-за низкой стоимости интеграции функций со стороны программного обеспечения (т.е. полной реализации различных функций различных подсистем в программной среде без необходимости увеличения технологических затрат). Кроме того, можно значительно увеличить технико-экономический синергетический потенциал в системе автомобиля в целом и улучшить потенциал дифференцирования различных производных с помощью одних и тех же электронных и программных модулей. Это означает, что электроника и программное обеспечение приобретают всё большую важность в области систем шасси, требуя междисциплинарного взаимодействия между аппаратной частью, электроникой и разработчиками ПО на очень ранних стадиях разработки для обеспечения эффективной и незатратной разработки мехатронных систем (см. [8]), особенно там, где безопасность движения является критичной.

Список литературы

[1] Heißing, B.; Ersoy, M. (редакторы): Справочник по ходовой части. 1-е издание, Vieweg Verlag, 2007.

[2] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Динамика автомобилей. 4-е издание, Springer-Verlag, 2004.

[3] Reimpell, J.; Betzler, J. W.: Основы ходовой части. 5-е издание, Vogel Verlag, 2005.

[4] Директива VDI 2057: Подверженность людей механической вибрации, вибрации всего тела.
VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb Дюссельдорф 2002.

[5] Cucuz, S.: Влияние стохастических неровностей и отдельных препятствий реальной дороги. Диссертация,
Университет Брауншвайга, 1992.

[6] Hennecke D.: Об оценке комфортабельности колебаний легкового автомобиля при нестационарных возбуждениях. VDI Progress Reports, Дюссельдорф, 1995.

[7] Mitschke, M.; Cucuz, S.; Hennecke, D.: Оценка и механизмы суммирования неравномерно беспорядочных колебаний. ATZ 97/11 (1995).

[8] ISO/DIS 26262: Автомобили – функциональная безопасность, 2009.

[9] ISO 2631: Механическая вибрация и удары – Оценка подверженности человека к вибрации всего тела.

Подвеска

Базовые принципы

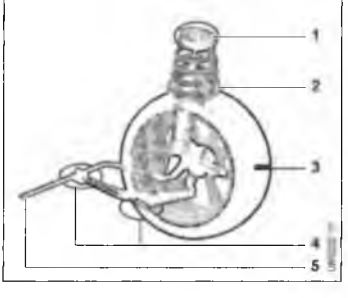
Система подвески автомобиля оказывает решающее влияние на характеристики вибрации и, следовательно, на комфортабельность езды и безопасность движения. В зависимости от категории автомобиля и условий использования преобладают различные решения. На рис. 1 показаны различные элементы конструкции подвески, для примера взята модель четверти автомобиля.

Общий принцип: к конструктивным элементам подвески относятся все детали подвески колес автомобиля, обеспечивающие возвратные силы в случае эластичной деформации. Материалами, выполняющими эту работу в различных системах подвески являются сталь (пружинная сталь), полимерные материалы (резина) или газ (воздух).

Шины

Будучи связующим звеном между дорожным покрытием и автомобилем, шина является первым конструктивным элементом подвески в передаточной цепочке между источником возбуждения и пассажирами, оказывающим решающее влияние и на комфорт (акустика, плавность хода), и на безопасность дорожного движения (потенциал продольных и поперечных сил). Это влияет на характеристики как подвески, так и амортизации, при этом шины не являются достаточными для отказа от других вибропоглощающих элементов в современных автомобилях. Исключением здесь будут, к примеру, строительные машины, где изменение требований к комфорту означает, что в большинстве случаев подвеска и амортизация достигаются посредством шин.

Рис. 1. Конструктивные элементы подвески колес (на примере подвески с полуосями типа МакФерсон):
1 – чашка амортизатора (сайлент-блок);
2 – пружина; 3 – шина; 4 – сайлент-блоки;
5 – стабилизатор поперечной устойчивости



Эластомерные крепления

Эластомерные крепления - это резиновые элементы с различными функциями и свойствами, которые соединяют между собой отдельные компоненты системы шасси или крепят их к кузову.

Резиновые крепления используются для виброизоляции и, соответственно, повышения комфорта, особенно в случае высокочастотного возбуждения (акустика). В то же время, подходящая конфигурация (геометрия, жесткость резиновых креплений и т.д.) может решающим образом повлиять на динамику движения.

В отличие от серийно выпускаемых автомобилей, в гоночных автомобилях используются универсальные шаровые соединения UniBall (а не соединения с резиновыми креплениями между подвеской колес и кузовом); это повышает динамику, но снижает комфорт.

Чтобы найти компромисс между обеспечивающими комфорт мягкими креплениями и улучшающими динамику жесткими креплениями, все чаще используются активные элементы подвески, способные адаптировать свои свойства к каждой ситуации.

Пружины кузова

Пружины кузова являются деталями шасси, создающими большую часть вертикальных возвратных сил между колесом и кузовом. В зависимости от ситуации, используются различные типы пружин с сильно разнящимися свойствами. Обзор характеристик конструктивных элементов подвески автомобиля приведен в табл. 1.

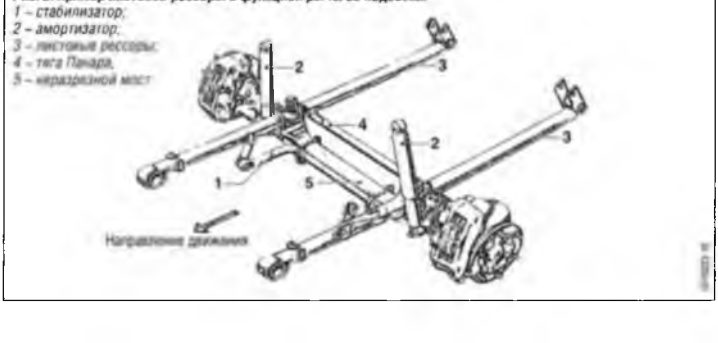
Таблица 1. Конструктивные элементы подвески автомобиля

Элемент подвески	Влияние нагрузки на собственную частоту колебаний кузова	Преимущество	Недостаток	Свойства
Стальные пружины				
Листовая рессора	– Собственная частота падает с ростом нагрузки. – Характеристические кривые обычно линейные	– Хорошая передача сил на шасси (грузовики). – Низкая стоимость	– Потребность в техобслуживании – Фрикционное демпфирование обычно неадекватное. – Акустика	– Возможность использования рычагов подвески. – Однослойный или многослойный вариант. – В зависимости от типа, трения (в легковом автомобиле трение уменьшает промежуточный пластмассовый слой —› положительно влияет на акустику)
Витая пружина		– Большая свобода конфигурации. – Низкая стоимость – нет внутреннего демпфирования. – Не занимает много места. – Малая масса – Не требует обслуживания	– Для рычагов подвески требуются отдельные элементы. – Характеристическая кривая пружины неизменна	– Возможно размещение амортизаторов внутри пружин. – Возможность достижения прогрессивной характеристической кривой из-за соответствующей геометрии пружин (изменяемый восходящий градиент или коническая)
Торсион		– Отсутствие износа, не требует обслуживания. – В зависимости от конструкции, возможна также регулировка клиренса	– Длинные пружины. – Жесткость пружины относительно колеса зависит от расположения рычага подвески	– Изготавливается из круглой стали (для небольшого веса) или плоской стали (с увеличенным напряжением)
Стабилизатор	– Отсутствие влияния на подвеску с одной и той же стороны. – При односторонней подвеске работает половина жесткости стабилизатора – При переменно нагружаемой подвеске используется вся жесткость стабилизатора	– Простая возможность влияния на динамику автомобиля. – Уменьшение крена – При использовании активных систем повышение комфорта и улучшение динамики	– Дополнительный вес – Затраты	– Влияние на поведение в поворотах (избыточная или недостаточная поворачиваемость). – Обычно используется U-образный, изогнутый полностью круглый или трубчатый материал – Стабилизаторы часто подвергаются плоской прокатке из-за напряжения при изгибе – Точки крепления стабилизатора располагаются слишком далеко на оси для получения небольшого диаметра – Оси вращения рычагов подвески имеют такую конфигурацию, что стабилизатор нагружается лишь на кручение (не на изгиб)

Таблица 1: Конструктивные элементы подвески автомобиля (продолжение)

Элемент подвески	Влияние нагрузки на собственную частоту колебаний кузова	Преимущество	Недостаток	Свойства
Пневмоподвеска и гидропневматическая подвеска				
Пневмоподвеска с U-образными сильфонами и пневмоподвеска с сильфонами	– Собственная частота с ростом нагрузки остается постоянной. – Характеристические кривые зависят от свойств газа, формы поршня качения и угла расположения нитей корда в сильфонах	– Характеристики комфортабельности не зависят от полезной нагрузки	– Для рычагов подвески требуются отдельные элементы. – Для низкого давления (< 10 бар) требуются большие объемы	– Реализация мягкой, вертикальной жесткости пружин. – Устанавливаются в виде пружинной стойки или отдельной пружины прежде всего на грузовые автомобили и автобусы. – Все чаще используются в легковых автомобилях для регулировки клиренса задней оси и всей подвески
Гидропневматическая подвеска	– Собственная частота растет с ростом нагрузки из-за нелинейной жесткости пружин	– Легкая интеграция гидравлического демпфирования и регулировки клиренса	– Необходимость в техобслуживании резиновой мембраны из-за тенденции к диффузии	– Объем газа в пружинном аккумуляторе определяет характеристики подвески – Энерговыделение посредством газа и масла. – Интеграция задвижек в амортизатор и в соединения между стойкой подвески и аккумулятором
Резиновые упругие элементы				
Резиновый упругий элемент	– На собственную частоту влияет рост нагрузки из-за нелинейной жесткости рессоры	– Свободно выбираемый дизайн. – Низкая стоимость	– Ограниченный диапазон температуры. – Старение	– Упругий элемент из вулканизированной резины между металлическими деталями. – Используются в качестве монтажного крепежа (двигатель и трансмиссия), в качестве сайлент-блоков в рычагах подвески, дополнительных рессор и т.д. – Все чаще используются с интегрированной гидравлической амортизацией

Рис. 2. Пример листовой рессоры с функцией рычагов подвески:
1 – стабилизатор;
2 – амортизатор;
3 – листовые рессоры;
4 – тяга Панара;
5 – неразрезной мост



Типы пружин

Листовые рессоры

Самыми старыми типами пружин, используемых в конструкции автомобилей, являются листовые рессоры, которые использовались еще в каретах (рис. 2). Наряду с функциональностью подвески, крупным преимуществом пружин этого типа является возможность использования в качестве конструктивного элемента подвески для соединения кузова и оси. Однако амортизирующие характеристики многослойных листовых рессор могут иметь отрицательный эффект (акустические влияния). Достигаемые ими смягчающие усилия недостаточны для полного отказа от традиционных амортизаторов.

Отрицательное влияние на комфорт и большая масса листовых рессор означают, что они больше не отвечают потребностям рынка легковых автомобилей и поэтому используются лишь в немногих из них (минивэнах, внедорожниках). Все еще обычным является использование этого типа пружин в грузовых автомобилях, благодаря невысокой стоимости и высокой надежности.

Винтовые пружины

Большая свобода конфигураций при низкой стоимости сделала винтовые пружины наиболее часто используемым типом пружин для кузовов легковых автомобилей. У пружин этого типа возвратные усилия создаются путем упругого кручения отдельных витков при изменении длины.

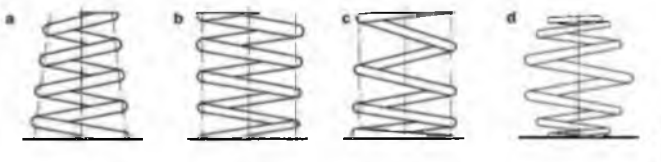
Так как винтовые пружины в основном способны поглощать силы в направлении своей продольной оси, то при их использовании в качестве кузовных пружин другие компоненты соединяются рычагами подвески.

Геометрическая конфигурация пружин, соответствующая заданным требованиям (толщина прутка, диаметр пружины и расстояние между витками, рис. 3), означает, что могут быть достигнуты не только разные расчетные мощности, но и разная прогрессия жесткости пружин на протяжении сжатия. Это, в свою очередь, можно использовать для влияния на зависящую от нагрузки собственную частоту кузова и, стало быть, комфортабельность езды.

Торсионы

Этот тип пружин в основном встречается в легковых автомобилях и минивэнах. Торсионы представляют собой валы из пружинной стали, подвергаемые кручению. Жесткое крепление одного конца вала и поворотное крепление другого его конца означает, что вал подвергается упругому кручению под нагрузкой в виде крутящего момента, действующего в направлении его оси. В легковом автомобиле упругое кручение торсионного вала достигается с помощью рычага, прикрепленного к поворотному концу вала (рис. 4). Как правило, эти рычаги являются рычагами подвески данной оси или подвески колеса. Торсионы обычно располагаются в несущем центре рычагов подвески со стороны кузова, на противоположный конец которых в качестве внешней нагрузки воздействует вертикальная сила колес F_R.

Рис. 3. Примеры конструкций различных типов винтовых пружин:
a – изменяемый диаметр пружины, b – изменяемый диаметр прутка;
c – изменяемое межвитковое расстояние, d – пружинный мини-блок (комбинация a, b и c)



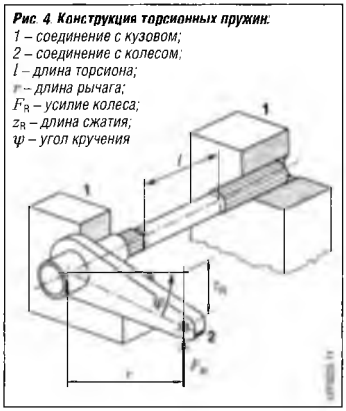


Рис. 4. Конструкция торсионных пружин:
1 – соединение с кузовом;
2 – соединение с колесом;
l – длина торсиона;
r – длина рычага;
F_R – усилие колеса;
z_R – длина сжатия;
ψ – угол кручения



Рис. 5. Конструкция пневмоподвески:
1 – кузов; 2 – пневмоподушка; 3 – колесо,
h_{th} – теоретическая длина пневмоподушки;
m_A – масса кузова; m_R – масса колеса;
p_i – давление в пневмоподвеске (внутреннее давление);
p_a – наружное давление;
V – рабочий объем пневмоподвески;
A – площадь, на которую воздействует давление газа

Пневматическая подвеска

Описанные выше кузовные пружины являются фиксированными, пружинящими средами, где работа выполняется за счет изменения формы стальных пружин. В отличие от них, работа пружины в случае с пневматической подвеской выполняется за счет изменения объема газа в подушке. Кузов автомобиля изолируется от источника возбуждения эффективным объемом газа (бывает также дополнительная жидкость, см. гидропневматические подвески) и вибрирует на газовой подушке внутри пневмоподвески (см. 5). В результате появляется благоприятная возможность интегрировать функцию регулирования клиренса, реализуемую путем закачивания или откачивания промежуточной среды (газа или жидкости).

Характеристическим параметром пневмоподвески является «теоретическая длина пневмоподушки» h_{th}, частное от зависящего от сжатия рабочего объема $V(z)$ (включая любой дополнительный объем) и эффективной площади поверхности A, на которую давит газ:

$$h_{th} = \frac{V(z)}{A} \qquad \text{(уравнение 1)},$$

где
z – длина сжатия.

Уравнение для силы сжатия баллона F:

$$F = (p_i - p_a)\,A \qquad \text{(уравнение 2)},$$

где
p_a – атмосферное давление,
p_i – внутреннее давление,

обычно приводит к следующему уравнению для жесткости пневмоподвески [1]:

$$c(z) = A\,n\,p(z)\,\frac{1}{h_{th}} \qquad \text{(уравнение 3)}.$$

Показатель политропы для изотермических и медленных движений подушки $n = 1$, а для адиабатических и быстрых движений подушки $n = 1{,}4$. Значения собственной угловой частоты вычисляются так же, как и для стальных пружин:

$$\omega_{Gas} = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{c(z)\,g}{(p - p_a)\,A}}$$

$$= \sqrt{\frac{g\,n\,p(z)}{(p - p_a)\,h_{th}}} \qquad \text{(уравнение 4)}.$$

При удовлетворении требований к относительно небольшому диаметру подушки $p_i >> p_a$. Это упрощает уравнение для собственной угловой частоты до следующего:

$$\omega_{Gas} = \sqrt{\frac{g\,n}{h_{th}}} \qquad \text{(уравнение 5)}.$$

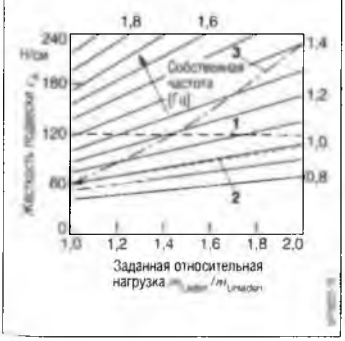
Однако упомянутая выше пневмоподвеска – теоретический поршневой цилиндр – исполь-

зуются в автомобилях только в измененном виде, при этом в принципе делается различие между двумя типами подвесок – сильфонная пневмоподвеска и гидропневматическая подвеска. Фундаментальная разница в отношении вертикальной динамики кроется во влиянии нагрузки на плавность хода и на жесткость упругих элементов в балансировке уровня обеих систем. В то время как в случае с гидропневматическими подвесками балансировка уровня достигается путем подкачки жидкости (с постоянной массой газа в подушке), у пневмоподвесок с сильфонами балансировка уровня происходит путем подкачки в подушку газа (воздуха) и, соответственно, восстановления исходного объема. Вызываемое этим изменение жесткости гидропневматических подвесок также приводит к зависимости нагрузки от собственной частоты кузова. В отличие от гидропневматической подвески пневмоподвеска с сильфонами имеет практически постоянную собственную частоту во всем диапазоне нагрузок.

На рис. 6 изображено влияние разных систем подвески на собственную частоту и также косвенно – на комфортабельность езды, с ростом нагрузки. Причинами влияния собственной частоты кузова на комфортабельность езды являются разные резонансные диапазоны различных органов человеческого организма и тот факт, что возбуждение частей тела человека с их собственной частотой вредит здоровью. Вот почему необходимо, чтобы собственная частота какого-либо тела, ниже резонансных частот человеческого тела, была как можно более независимой от нагрузки.

Однако на рис. 6 также хорошо видно, что приблизительно постоянная собственная частота с растущей нагрузкой имеет место только в случае с пневмоподвесками. В случае со стальными упругими элементами собственная частота падает из-за постоянной жесткости пружины; с другой стороны, в гидропневматической системе она растет.

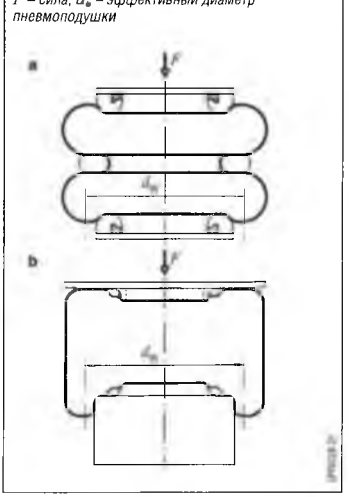
Рис. 6. Сравнение действий различных систем подвески в зависимости от полезной нагрузки:
1 – стальная пружина; 2 – пневмоподвеска; 3 – гидропневматическая подвеска



Пневмоподвеска с сильфонами

Пневмоподвески с сильфонами с пневматической регулировкой клиренса имеют постоянный объем газа (см. выше) и делятся на две категории. В первую очередь, это пневмоподвески с сильфонами и во вторую – пневмоподвески с U-образными сильфонами (рис. 7), которые аналогично пневматическим шинам состоят из резины, армированной тканью. В этих системах регулировка клиренса реализована путем подкачки или откачки газа, при этом объем подвески остается постоянным. Эффективная площадь пневмоподушек

Рис. 7. Пневмоподвеска с сильфонами:
a – сильфоны, b – U-образные сильфоны; F – сила, d_e – эффективный диаметр пневмоподушки



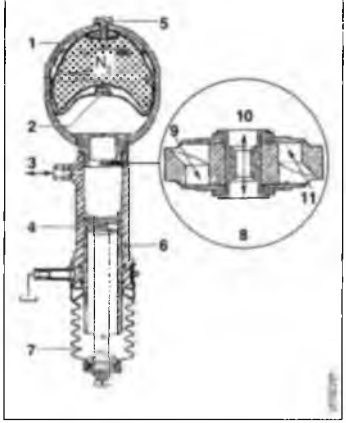
(и, соответственно, градиент возвратной силы), затрагиваемая избыточным давлением, обычно непостоянна. Это позволяет повлиять на грузоподъемность путем проектирования контуров поршня пневмоподвески с U-образными сильфонами (и, соответственно, изменение эффективной площади A в уравнении 3 через диапазон подвески). Эффективную площадь A пневмоподвески можно определить через эффективный диаметр. С интеграцией дополнительного объема (увеличение h_{th}, см. рис. 5) можно достичь менее прогрессивной характеристической кривой.

Гидропневматические подвески

В соответствии с вышесказанным гидропневматические подвески (рис. 8) со встроенной регулировкой клиренса представляют собой пневмоподвески с постоянной массой газа (см. выше), при этом поток энергии проходит не только с помощью газа, но и жидкости. Здесь жидкость и газ разделяются непроницаемой резиновой мембраной. Износостойкое, с низким коэффициентом трения, уплотнение между поршнем и цилиндром достигается лишь при наличии жидкости внутри.

Другим преимуществом этой системы является возможность интеграции гидравлической амортизации в конструктивный элемент подвески. С другой стороны, недостатком является зависимость от собственной частоты при нагрузке (влияние на комфорт). Причиной этого является подкачка и откачка жидкостей при постоянной массе газа, необходимой для регулирования клиренса. Чувствительное к нагрузке изменение объема газа приводит к смещению жесткости подвески таким образом, что с ростом нагрузки фундаментально растет собственная частота (см. рис. 6).

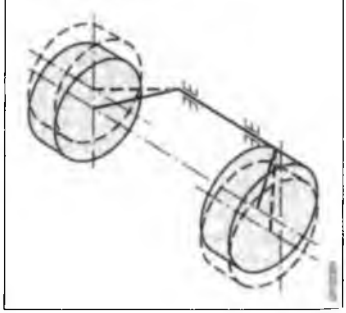
Рис. 8. Гидропневматическая подвеска:
1 – шар подвески; 2 – мембрана; 3 – соединение с регулятором клиренса, 4 – поршень; 5 – колпачок; 6 – цилиндр подвески; 7 – манжетное уплотнение; 8 – клапан амортизатора, 9 – фаза отдачи; 10 – обход; 11 – фаза сжатия



Стабилизаторы поперечной устойчивости

Описанные выше системы подвески используются главным образом для вертикальной амортизации автомобиля. Для устранения поперечной раскачки, с другой стороны, наряду с классическими пружинами кузова используются дополнительные пассивные или активные стабилизирующие штанги (при определенных обстоятельствах – с дополнительной аморти-

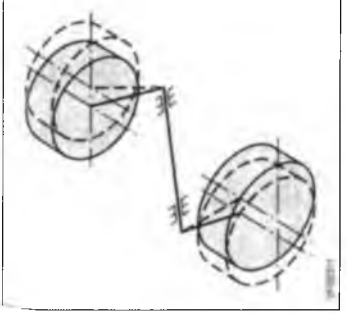
Рис. 9. Принцип работы стабилизатора поперечной устойчивости



зацией крена). Принципиальная схема приведена на рис. 9. В случае крена кузова, т.е. изменения длины пружин колес одной оси в разных направлениях, стабилизатор подвергается кручению и выдает компенсирующий крутящий момент вокруг оси качения. С другой стороны, в случае чисто вертикальных перемещений одной оси стабилизатор не оказывает никакого эффекта. Если пропорции поперечного раскачивания, компенсируемого стабилизаторами на передней и задней осях, отличаются от пропорций, компенсируемых пружинами кузова, то не только уменьшается угол крена, но также изменяется распределение разностей в нагрузке на колеса одной оси на поворотах.

У автомобиля с соответствующей конфигурацией стабилизаторов это может сместить характеристики рулевого управления в сторону недостаточной поворачиваемости (увеличение жесткости качения на передней оси или уменьшение жесткости качения на задней оси) или избыточной поворачиваемости, при этом все параметры остаются неизменными. В случае с активными стабилизаторами можно активно регулировать усилие стабилизатора, адаптируя его к дорожной ситуации. Это позволяет снизить, например, эффект копирования на одной оси (из-за разъединения правой и левой сторон), когда автомобиль движется прямо, но это также повышает динамику движения на поворотах, минимизируя крен кузова. В этом случае стабилизаторы не влияют на характеристики вертикальной вибрации автомобиля.

Рис. 10. Принцип работы компенсаторной пружины



Компенсаторные пружины

Компенсаторные пружины оказывают эффект, противоположный эффекту стабилизатора (рис. 10). Будучи чисто ударным элементом, они не работают при поперечной раскачке кузова.

Компенсаторная пружина в прошлом использовалась в конструкции осей, где кинематика подвески колес требовала как можно сильнее уменьшить разницу между нагрузками на колеса для подавления «эффекта покоя» (более сильная отдача на колесе, находящимся на внутреннем радиусе поворота по сравнению со сжатием пружины на колесе, движущемся по внешнему радиусу поворота). Тогда можно было бы соответственно уменьшить жесткость подвески кузова. Компенсаторные пружины в подвесках современных легковых автомобилей больше не используются.

Системы подвесок

Рост требований потребителей к комфорту и динамике легковых автомобилей и сильно колеблющиеся нагрузки грузовых автомобилей означают, что исключительное использование традиционных стальных пружин часто недостаточно. В таких случаях применяются либо частично нагруженные, либо полностью нагруженные системы подвески.

Интеграция дополнительных функций частично либо полностью нагруженных систем позволяет повысить и комфорт, и динамику (например, поперечная блокировка пружин одной оси для повышения устойчивости на поворотах).

Частично нагруженные системы подвески
Эти системы характеризуются тем, что компенсируемые подвеской силы распределяются между стальными пружинами и пневмоподушками в заданном соотношении.

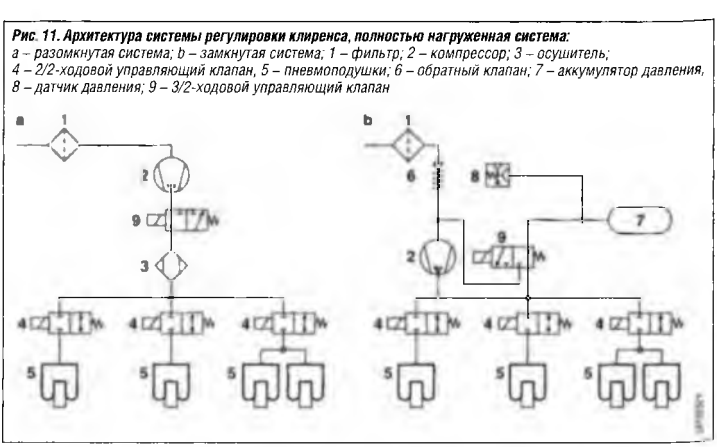
В случае с мягкими пружинами кузова (для повышения комфорта) при загрузке машины имеет место сильное проседание пружин. Во избежание слишком сильного опускания кузова используются системы регулировки клиренса с пневмоподушками или гидропневматическими упругими элементами. Здесь датчики определяют клиренс и передают эту информацию на систему управления. Путем закачки или выпуска воздуха (пневмоподвески с сильфонами) или масла (гидропневматические подвески) можно отрегулировать клиренс согласно потребностям. В зависимости от сегмента (легковые или грузовые автомобили) системы регулировки клиренса имеют различные дополнительные функции.

К примеру, в легковых автомобилях клиренс может регулироваться в зависимости от скорости для экономии топлива. Регулировку клиренса можно также использовать на плохих дорогах для расширения возможностей автомобиля в преодолении ухабистых участков.

В случае же с грузовыми автомобилями регулировка клиренса позволяет адаптировать зону погрузки к различным погрузочным эстакадам. Другие функции можно реализовать путем объединения в сеть с другими системами. К ним, например, относятся автоматическое увеличение клиренса при подъеме оси, уменьшении клиренса при превышении максимальной нагрузки на ось, или кратковременный подъем оси для увеличения нагрузки на колеса приводной оси.

Полностью нагруженные системы подвески
В отличие от частично нагруженных систем у полностью нагруженных систем задача подвески выполняется только пневмоподушками, и спиральные пружины абсолютно не нужны. В зависимости от аппаратной части и стратегии управления регулирование клиренса может выполняться на выбранных осях либо на

Рис. 11. Архитектура системы регулировки клиренса, полностью нагруженная система:
a – разомкнутая система; b – замкнутая система; 1 – фильтр; 2 – компрессор; 3 – осушитель; 4 – 2/2-ходовой управляющий клапан, 5 – пневмоподушки; 6 – обратный клапан; 7 – аккумулятор давления, 8 – датчик давления; 9 – 3/2-ходовой управляющий клапан



всех осях. Встраивание архитектуры системы управления в глобальную архитектуру управления автомобиля обеспечивает исключение отрицательного взаимного влияния осей, что предотвращает, например, нежелательный наклон кузова автомобиля.

Общий принцип: регулирование клиренса для полностью нагруженных систем можно реализовать в виде открытой или закрытой системы.

В случае открытой системы компрессор забирает атмосферный воздух, сжимает его и при необходимости подает на пневмоподушки. С ростом давления увеличивается клиренс. Для уменьшения клиренса воздух выпускается в окружающую среду, и давление в пневмоподушках снова падает. Хотя конструкция этой системы относительно недорогая и имеет простую систему управления, решающим недостатком ее является необходимость обеспечения высокой производительности компрессора в течение коротких периодов управления. Кроме того, требуется воздухоосушитель, и при засасывании и выдувании воздуха может возникать сильный шум.

Закрытая система засасывает воздух из аккумулятора давления системы подвески и подает его прямо на пневмоподушки. При уменьшении клиренса сжатый воздух возвращается в напорный резервуар. Хотя требования к производительности компрессора для этой системы ниже, и воздухоосушитель не требуется, поскольку рабочая среда уже сухая, но требуются другие компоненты (аккумулятор, датчик давления, обратный клапан, возвратный трубопровод и т.д.), фундаментально повышающие стоимость конструкции по сравнению с открытой системой.

Архитектура открытой и закрытой систем регулировки клиренса показана на рис. 11. На нем хорошо видно, что закрытая система сложнее открытой.

Активные системы подвески

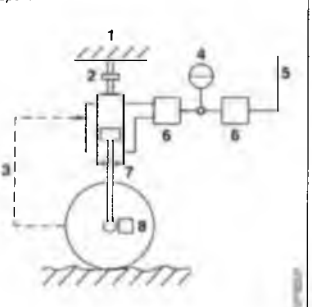
По сравнению с пассивными системами активные системы подвески позволяют оптимально адаптировать усилия пружин и амортизаторов ко всем ситуациям движения и неровностям дороги. С помощью внешних источников энергии создаются силы, стабилизирующие и оси, и кузов. Со временем было разработано несколько систем различной архитектуры. Они отличаются прежде всего стоимостью (расчетной мощностью и затратами), энергопотреблением и качеством операций управления. Несколько этих систем кратко описаны ниже.

Системы с гидроцилиндрами

Здесь движения кузова и его положение кузова регулируются с помощью быстро настраиваемых гидроцилиндров (рис. 12), при этом поступающая с датчиков информация (нагрузка на колесо, ускорение и т.д.) служит входными переменными для операций управления.

Система управления позволяет достичь постоянной нагрузки на колесо с поддержанием среднего клиренса автомобиля неизменным. Статическую нагрузку на колесо в этом случае несут стальные пружины или гидропневматические упругие элементы.

Рис. 12. Активная подвеска с гидроцилиндром: *1 – кузов автомобиля; 2 – датчик нагрузки на колесо; 3 – датчик хода; 4 – аккумулятор; 5 – контур накачки; 6 – сервоклапан; 7 – гидравлический цилиндр; 8 – датчик ускорения*



Системы с гидропневматической подвеской

Для стабилизации автомобиля в гидропневматической подвеске используется специальное масляное регулирование. Оно происходит путем закачки гидравлического масла в амортизационные стойки или слива масла из них (рис. 13). Для ограничения поглощения энергии стратегия управления этой системы состоит из операций управления, предотвращающих длинноволновые неровности (низкочастотные возбуждения). В случае более высокочастотных возбуждений, вступает в действие объем газа. Здесь амортизатор по сути адаптируется к движениям колеса.

Вариант с регулировкой точки крепления пружины подвески

В этой системе кузов автомобиля удерживается горизонтально в низкочастотном диапазоне, и традиционная винтовая пружина имеет регулировку в своей точке крепления (либо относительно кузова, либо относительно оси, рис. 14). Основание поднимается для сжатия пружины и опускается для ее разжатия. Операции управления непрерывны, благодаря насосу и дозирующим клапанам. Однако винтовая пружина должна быть длиннее по сравнению с ее оригинальной конструкцией. В системе этого типа амортизаторы могут иметь постоянные параметры регулировки и, самое главное, их можно согласовывать с колесными амортизаторами.

Версия с системой пневмоподвески

Для достижения хорошей динамики системы с активной пневмоподвеской требуются быстрые изменения давления (нагнетание и сброс) в сильфонах пневмоподушек. Это можно реализовать с помощью механизма смещения (здесь одной мощности компрессора недостаточно), который, в зависимости от ситуации, забирает воздух из пневморессоры колеса, расположенного на внутреннем радиусе поворота и подает его на сильфоны пневмоподушки колеса, расположенного на внешнем радиусе поворота (рис. 15), чтобы кузов сохранял горизонтальное положение. Привод механизма смещения может быть электрическим, гидравлическим или электрогидравлическим. Возможны также комбинации с другими автомобильными системами.

Электромагнитная система

В случае с активной электромагнитной системой подвески на каждое колесо устанавливаются линейные электромагнитные двигатели. Они способны активно компенсировать неровности дороги. Линейные двигатели запитываются от усилителей мощности, при этом можно реализовать либо управление силой, либо управление перемещением. Система межосевой стабилизации также позволяет компен-

Рис. 13. Гидропневматическая система активной подвески:
1 – кузов автомобиля; 2 – датчик хода; 3 – аккумулятор, 4 – контур накачки; 5 – датчик ускорения; 6 – дроссель; 7 – дозирующий клапан; 8 – поршень амортизатора с клапанами



Рис. 14. Регулировка точки крепления винтовой пружины:
1 – кузов автомобиля; 2 – датчик хода; 3 – аккумулятор; 4 – контур накачки (масло); 5 – датчик ускорения; 6 – дроссель; 7 – дозирующий клапан; 8 – пружина (винтовая), 9 – регулятор точки крепления пружины



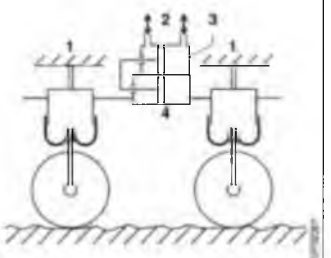
сировать поперечную и продольную раскачку. В реализуемом в настоящее время решении статические нагрузки на колеса поглощаются с помощью торсионов на колесах, ограничивающих потребность в электроэнергии. Также используется пассивный амортизатор.

Преимущества электромагнитной системы состоят прежде всего в высокой скорости регулирования. Несмотря на небольшие габариты, электродвигатели имеют достаточную мощность для обеспечения безопасности дорожного движения во всех ситуациях. Недостатками же по сравнению с традиционными системами являются большой вес и стоимость, поскольку из соображений безопасности требуется дополнительная, неэлектронная система амортизации. Общий принцип: линейный электромагнитный двигатель может работать в качестве генератора, что означает возможность рекуперации энергии. Это позволяет снизить энергопотребление системы, которое для стандартных дорожных покрытий составляет менее 1 кВт.

Список литературы

[1] Heißing, B.; Ersoy, M. (Editors): Fahrwerkhandbuch. 1st Edition, Vieweg Verlag, 2007.
[2] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4th Edition, Springer-Verlag 2004.
[3] Reimpell, J.; Betzler, J. W.: Fahrwerktechnik – Grundlagen. 5th Edition, Vogel Verlag, 2005.
[4] Eckstein, L.: Vertikal- und Querdynamik von Kraftfahrzeugen, ika/fka 2010.

Рис. 15. Активная система с пневмоподвеской:
1 – кузов автомобиля;
2 – дополнительная мощность;
3 – дополнительный блок смещения;
4 – блок смещения объема воздуха



Амортизаторы и вибропоглотители

Амортизаторы

Кузов автомобиля и колеса, соединенные с кузовом пружинами, образуют систему, способную вибрировать и возбуждаемую неровностями дороги и динамическими движениями автомобиля. Для гашения вибрации необходимы амортизаторы. Сегодня в автомобилях в качестве кузовных амортизаторов используются почти исключительно гидравлические амортизаторы; они преобразуют кинетическую энергию кузова и вибрации колес в тепло. Амортизаторы настраиваются с учетом частично конфликтующих требований к комфорту (минимизация ускорений кузова) и безопасности дорожного движения (минимизация колебаний нагрузки на колеса).

Базовые принципы гидравлических телескопических амортизаторов

Амортизирующий эффект гидравлических телескопических амортизаторов (рис. 1) основан на перемещении, зависящем от гидравлического сопротивления поршня амортизатора, снабженного дроссельными элементами (демпфирующими клапанами) в заполненном маслом рабочем цилиндре. В этом процессе механическая работа преобразуется в тепловую энергию, выпускаемую в окружающую среду через поверхность амортизатора. Разность давления Δp между двумя рабочими камерами и эффективными поверхностями, вызванная дросселирующими элементами с обеих сторон поршня амортизатора, создает результирующее усилие амортизатора F_D при вдвигании и выдвигании штока. Площадь, на которую воздействует давление, преобладающее в каждой рабочей камере, соответствует кольцевой поверхности $A_{КР}$ для рабочей камеры, через которую проходит шток поршня амортизатора (рабочая камера 1 на рис. 1). Внешний диаметр кольцевой поверхности соответствует диаметру D поршня амортизатора; внутренний диаметр соответствует диаметру d штока поршня.

Эту площадь можно описать выражением:

$$A_{КР} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2).$$

В другой рабочей камере (рабочая камера 2 на рис. 1) эффективная площадь соответствует площади поршня $A_К$, пропорциональной диаметру D поршня амортизатора.

$$A_К = \frac{\pi}{4} D^2.$$

При перемещении поршня амортизатора (т.е. втягивании или вытягивании штока) изменение объема в двух рабочих камерах приводят к перетеканию несжимаемой рабочей жидкости между рабочими камерами амортизатора (у двухтрубных амортизаторов, кроме того, и между рабочей, и компенсаторной камерами). Масло в каждом случае должно протечь через соответствующие клапаны амортизатора.

Расход масла, протекающего через соответствующие клапаны амортизатора, зависит от геометрии амортизатора и скорости втягивания или вытягивания z. Расход Q_1 между двумя рабочими камерами можно описать следующим выражением:

$$Q_1 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\dot{z}.$$

Втягивание или вытягивание штока гидравлического телескопического амортизатора приводит к переменному общему объему рабочих камер, зависящему от состояния – втянутого или вытянутого. Несжимаемость масла в амортизаторе означает необходимость компенсирования вытесняемого штоком масла. Этот компенсирующий объем Q_2 можно описать следующим выражением:

$$Q_2 = \frac{\pi}{4} d^2 \dot{z}.$$

Объемный расход Q через клапан амортизатора связан через характеристики расхода каждого клапана с преобладающей разностью давления Δp. Характеристики расхода клапана получаются из суммарного эффекта геометрии дросселя (например, диаметра проточного канала) и нагрузки на пружину (т.е. зависящее от давления изменение выпускного отверстия, рис. 1). Характеристики расхода можно адаптировать к потребностям

каждой ситуации путем конфигурации и координации этих параметров. Характеристики клапанов нужно проектировать таким образом, чтобы не происходило кавитации (образования и имплозии пузырьков газа в рабочей среде из-за колебаний статического давления в диапазоне давления пара рабочей среды) внутри амортизатора. Кавитация ведет к появлению шума и повреждениям – и в конечном итоге к выходу амортизатора из строя.

Типы гидравлических телескопических амортизаторов

Однотрубные амортизаторы

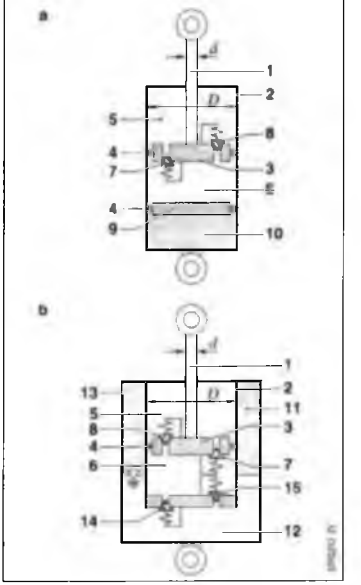
Для компенсирования объема при втягивании и вытягивании штока у однотрубных амортизаторов имеется закрытый объем газа, изолированный от рабочих камер, заполненных маслом, с помощью подвижного разделительного поршня (рис. 1, a). В фазе сжатия (вдвигание штока) газ сжимается соответственно расходу Q_2; в фазе отдачи (выдвигание), он разжимается соответственно расходу Q_2. Как правило, давление газа составляет от 25 до 35 бар, то есть могут быть поглощены максимальные усилия втягивания. Рабочий объем Q_1 протекает через каждый из клапанов амортизатора в поршне амортизатора. При вдвигании штока масло протекает через клапан фазы сжатия, а при выдвигании – через клапан фазы отдачи.

Высокое давление газа означает, что в случае с однотрубным амортизатором вероятность возникновения кавитации мала. Создаваемое тепло может передаваться в окружающую среду прямо через внешнюю поверхность рабочего цилиндра. Преимущества компактной конструкции, малой массы и произвольной установки однотрубных амортизаторов «компенсируются» большой длиной, повышенным трением и более жесткими требованиями к уплотнению штока и объему газа.

Двухтрубные амортизаторы

Двухтрубные амортизаторы имеют компенсаторную камеру, что обусловлено расположением внешней трубы вокруг рабочего цилиндра (рис. 1, b). Компенсаторная камера уравнивает изменяющийся объем при втягивании и вытягивании штока амортизатора. Для этого она через донные клапаны соеди-

Рис. 1. Устройство однотрубного и двухтрубного амортизаторов:
a – однотрубный амортизатор, b – двухтрубный амортизатор; 1 – шток поршня; 2 – рабочий цилиндр; 3 – поршень амортизатора; 4 – уплотнение поршня, 5 – рабочая камера 1, 6 – рабочая камера 2, 7 – клапан амортизатора (клапан фазы отдачи); 8 – клапан амортизатора (клапан фазы сжатия); 9 – разделительный поршень, 10 – объем газа; 11 – компенсаторная камера; 12 – резервный объем, 13 – внешняя труба; 14 – донный клапан (клапан фазы сжатия); 15 – донный клапан (клапан фазы отдачи); D – внутренний диаметр рабочего цилиндра и диаметр поршня амортизатора, d – диаметр штока поршня



нена с нижней рабочей камерой амортизатора. Компенсаторная камера частично заполнена маслом и частично - газом (как правило, воздухом). Газ обычно находится под атмосферным или немного повышенным (6 - 8 бар) давлением. Поршень и донные клапаны должны быть скоординированы таким образом, чтобы не возникала кавитация. Поэтому на фазе сжатия, т.е. при вдвигании штока, амортизирующая работа выполняется на соответствующем донном клапане, через который протекает масло с расходом Q_2. С другой стороны, масло с расходом Q_1 может перетекать из нижней рабочей камеры в верхнюю только через клапан фазы сжатия в поршне амортизатора с низким сопротивлением потоку. Это предотвращает резкое падение давления в верхней рабочей камере. В фазе отдачи, т.е. при выдвигании штока - наоборот, амортизирующая работа выполняется главным образом объемом масла Q_1, перетекающего из верхней рабочей камеры в нижнюю через соответствующий клапан в поршне. Донный клапан лишь уравнивает объем при вытягивании штока; при этом масло практически без сопротивления перетекает из компенсаторной камеры в нижнюю рабочую камеру (с расходом Q_2).

Наличие компенсаторной камеры означает, что теплоотдача у двухтрубных амортизаторов происходит хуже, чем у однотрубных. Кроме того, это подразумевает ограничения по расположению двухтрубных амортизаторов, так как необходимо постоянное наличие компенсаторной жидкости на донных клапанах. Преимуществами же по сравнению с однотрубными амортизаторами являются меньшая длина, более мягкое реагирование, а также менее жесткие требования к сальникам. В легковых автомобилях в качестве стандартных амортизаторов преобладают двухтрубные – в том числе и из-за более низкой стоимости.

Рис. 2. Регулируемый амортизатор, характеристические кривые:
1 – верхний предел диапазона регулировки (максимальная жесткость демпфирования, например, в спортивном режиме),
2 – нижний предел диапазона регулировки (максимальная жесткость демпфирования, например, в комфортабельном режиме);
3 – диапазон регулировки амортизатора,
4 – характеристическая кривая пассивного амортизатора



Регулируемые амортизаторы

Конфликт целей у кузовных амортизаторов в плане поиска компромисса между комфортабельностью езды и безопасностью дорожного движения можно смягчить путем использования адаптивных или полуактивных амортизаторов. По сравнению с пассивными амортизаторами с фиксированными характеристиками (т.е. предопределенными характеристиками силы и скорости, см. раздел «Характеристики демпфирования»), адаптивные амортизаторы обеспечивают возможность дискретной, сколь угодно изменяемой регулировки характеристик демпфирования (рис. 2).

Наряду с ручной регулировкой амортизаторов (например, мягкая амортизация в режиме комфортабельной езды или жесткая амортизация в спортивном режиме), регулировка амортизаторов может активироваться и автоматически в зависимости от ситуации (см. раздел «Управление демпфированием»).

Адаптивные гидравлические амортизаторы

В случае адаптивных или полуактивных амортизаторов традиционной конструкции возможность регулировки демпфирования реализуется с помощью регулируемых клапанов в амортизаторах, байпасных отверстий, которые можно задействовать (они размещаются снаружи либо внутри), или с помощью двойных поршней [1]. Как правило, активация электронная. Основными параметрами системы являются достигаемое время регулировки, диапазон регулировки и количество задаваемых характеристик амортизаторов. В то время как системы первого поколения позволяли выполнять регулировку лишь по нескольким кривым, нынешние адаптивные амортизаторы обычно можно настроить на большое количество характеристик [2]. Более новые системы обычно имеют бесконечно изменяемую регулировку от минимальных до максимальных усилий амортизаторов (рис. 2).

Реологические системы амортизаторов

Возможность регулировки характеристик амортизации в случае реологических систем амортизаторов основана на изменении свойств потока используемой рабочей среды. Здесь вместо обычных минеральных масел используются магнето-реологические или электрореологические жидкости, изменяющие свою вязкость под влиянием магнитного или электрического поля. Вязкость рабочей среды напрямую влияет на сопротивление потоку через клапаны амортизаторов. Если, к примеру, создание магнитного поля увеличивает вязкость магнето-реологической рабочей среды, то сопротивление потоку через клапаны амортизаторов растет. Реологические системы амортизаторов дают возможность не только бесконечной регулировки характеристик амортизаторов, но и достижения очень короткого времени регулирования [2].

Характеристики демпфирования

Демпфирующая сила – это функция скорости втягивания или вытягивания штока амортизатора, при этом направление силы всегда противоположно направлению скорости. Вообще говоря, демпфирующая сила F_D и скорость z связаны через постоянную демпфирования k_D и показатель степени демпфирования n. Это можно описать выражением:

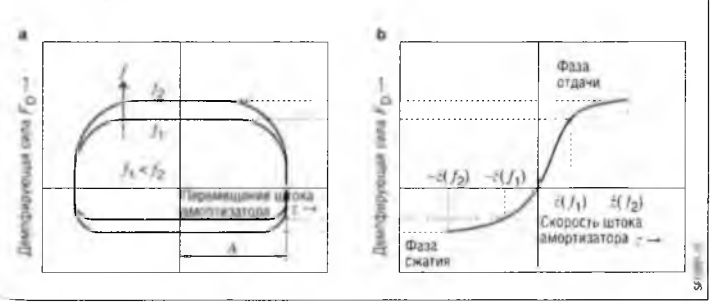
$$F_D = -\text{sign}(z) \cdot k_D \cdot |z|^n .$$

Постоянная демпфирования и показатель степени демпфирования главным образом зависят от конструкции амортизатора (характеристик клапана, геометрии). С соответствующей конфигурацией отдельных параметров можно создать различные кривые демпфирования – от прогрессивных до дегрессивных. Современные кузовные амортизаторы имеют в основном дегрессивные характеристики. Это позволяет достичь хорошего демпфирования при низких скоростях возбуждения, а также ограничить максимальные усилия амортизаторов.

Кривые характеристик демпфирования обычно определяются с помощью механических или сервогидравлических тест-блоков. В результате синусоидального возбуждения постоянной амплитуды и переменной частоты или постоянной частоты и переменной амплитуды получаются различные максимальные скорости втягивания и вытягивания штока амортизатора. Записанные сигналы перемещения и силы можно применить на схеме «сила-перемещение» (рабочей схеме) (рис. 3, a). Характеристическая кривая силы-скорости амортизатора (характеристическая кривая демпфирования) может быть выведена из рабочей схемы путем переноса максимальной силы и скорости (рис. 3, b).

В основном причины различий между фазами сжатия и отдачи связаны с вопросом комфортабельности подвески. Усилия амортизатора, создаваемые в фазе отдачи,

Рис. 3. Характеристики демпфирования:
a – рабочая схема (схема «сила-перемещение»); b – характеристическая кривая демпфирования (схема «сила-скорость»); f - переменная частота возбуждения; f_1 – частота возбуждения 1, f_2 – частота возбуждения 2; $z(f_1)$ – максимальная скорость амортизатора с f_1; $z(f_2)$ – максимальная скорость амортизатора с f_2. A – постоянная амплитуда вибрации



обычно более чем в два раза превосходят соответствующие силы при сжатии (т.е. в фазе сжатия) амортизатора (рис. 3). Это ограничивает влияние сил на кузов автомобиля в фазе сжатия (комфорт) и одновременно обеспечивает сильную амортизацию системы (разрядка системы) в фазе отдачи.

Управление демпфированием

В сочетании с электронно регулируемыми амортизаторами сегодня все шире используются системы управления демпфированием. Основными компонентами такой системы управления демпфированием являются адаптивные амортизаторы и датчики (например, датчики ускорения на колесе и кузове) и интеллектуальные алгоритмы и стратегии управления. С помощью датчиков и алгоритмов непрерывно определяется и анализируется текущее состояние движения. В соответствии с записанными стратегиями управления это позволяет системе управления адаптировать характеристики амортизатора к каждому состоянию движения путем активации амортизаторов – к примеру, оптимизированием комфортабельности езды или безопасности движения.

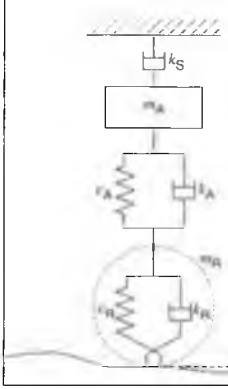


Рис. 4. Теоретические принципы подхода Skyhook: *k_S – постоянная демпфирования воображаемого прикрепленного к небу амортизатора, m_A – масса кузова; z_A – вертикальное перемещение кузова, c_A – жесткость пружин автомобиля, k_A – постоянная демпфирования амортизаторов автомобиля, m_R – масса колеса (неподрессоренная масса); z_R – вертикальное движение колеса; c_R – вертикальная жесткость шины, k_S – постоянная демпфирования шины; h – вертикальное перемещение от возбуждения, создаваемого дорогой*

Стратегии управления

Стратегия пороговых значений

Контроллеры пороговых значений сравнивают одну или несколько переменных состояния движения (например, ускорение кузова, угол поворота) с соответствующими пороговыми значениями и инициируют определенные меры при превышении или недостижении пороговых значений. Усилия амортизаторов обычно изменяются одновременно в направлениях отдачи и сжатия. Основная задача контроллеров пороговых значений – повышение комфорта при одновременном сохранении безопасности движения.

Наряду с влиянием чисто на характеристики вертикальной вибрации можно также оптимизировать индуцированные движения кузова. Например, контроль угла поворота может привести к уменьшению динамического качения или повышение жесткости амортизатора в зависимости от давления на педаль тормоза может уменьшить «клевание носом» при торможении.

Skyhook

Стратегия управления Skyhook (англ. «подвешенный к небу») призвана сохранять спокойное состояние кузова независимо от текущего состояния движения и дорожного полотна. Она прежде всего предназначена для повышения комфортабельности езды. В отличие от стратегии пороговых значений, стратегия управления Skyhook регулирует характеристики демпфирования на каждом отдельном колесе. Основной принцип – изолирование движений кузова от создаваемого дорогой возбуждения. Для этого вообразим, что кузов соединен амортизатором с небом (рис. 4). Усилие F_{DS} амортизатора Skyhook получается из скорости кузова z_A и постоянной демпфирования k_S воображаемого соединенного с небом амортизатора:

$$F_{DS} = k_S \dot{z}_A .$$

Для традиционной вибрационной системы, с другой стороны, усилие амортизатора F_D будет получаться из постоянной демпфирования k_A кузовного амортизатора и разности

между вертикальной скоростью кузова $\dot{z}_A$ и вертикальной скоростью колеса z_R:

$$F_D = k_A (z_A - z_R) .$$

Чтобы «прикрепить» кузов к небу, кузовным амортизатором в реальности должна бы быть приложена дополнительная часть усилия F_{DS} воображаемого соединенного с небом амортизатора. Необходимый для этого пропорциональный коэффициент демпфирования k_{AS} вычисляется по формуле:

$$k_{AS} = \frac{k_S \dot{z}_A}{\dot{z}_A - \dot{z}_R}$$

Поскольку адаптивный (полуактивный) амортизатор способен лишь выделять энергию из системы в виде тепла, но не способен передавать тепло в систему, требуется разграничение случаев [1], [2]. Это можно описать выражениями:

$$F_{Dtol} = \left(k_S \frac{\dot{z}_A}{\dot{z}_A - \dot{z}_R} + k_A \right) \cdot (\dot{z}_A - \dot{z}_R),$$

где $\dot{z}_A (\dot{z}_A - \dot{z}_R) \geq 0$, и

$$F_{Dtol} = k_A (\dot{z}_A - \dot{z}_R),$$

где $\dot{z}_A (\dot{z}_A - \dot{z}_R) < 0$.

В зависимости от величины и направления скорости кузова и перемещения амортизатора (отдача или сжатие), стратегия управления для метода Skyhook, изображенная на рис. 5, призвана обеспечить комфортабельную амортизацию кузова. Однако этот подход не учитывает частные случаи амортизации бокового и килевого раскачивания и вибраций колес. Эти перемещения также имеют большое значение в плане комфорта и безопасности движения. Это означает, что контроллер Skyhook обычно блокируется другими контроллерами.

Groundhook

Контроллер Groundhook (англ. «прицепленный к земле») призван повысить безопасность движения путем уменьшения колебаний нагрузки на колеса. Здесь, по аналогии со стратегией Skyhook, мы представляем себе, что колесо соединено амортизатором с дорогой (рис. 6), и выводится пропорциональный коэффициент демпфирования k_{AG}. По аналогии со взятием производной для контроллера Skyhook:

$$k_{AG} = k_G \frac{\dot{z}_R - \dot{h}}{\dot{z}_R - \dot{z}_A},$$

где:

$\dot{z}_A$ – вертикальная скорость колеса;

$\dot{z}_R$ – скорость колеса;

$\dot{h}$ – вертикальная скорость от возбуждения, создаваемого дорогой;

k_G – постоянная демпфирования.

Рис. 5. Стратегия управления системы Skyhook (разграничение случаев)

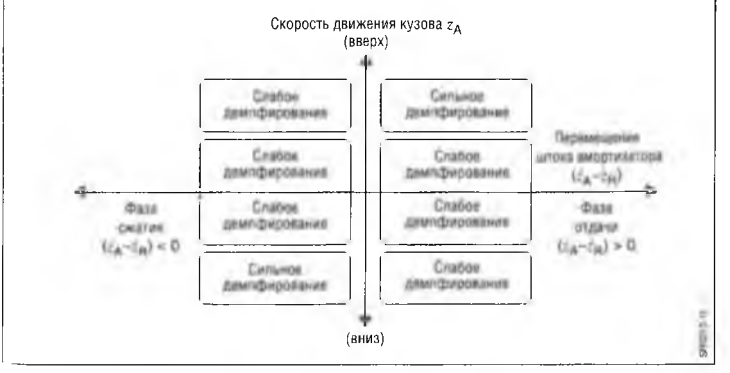
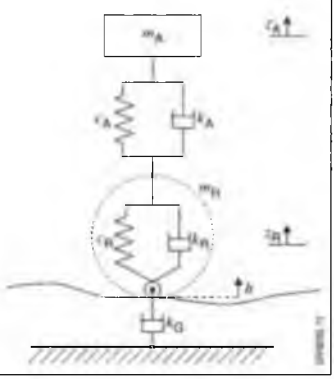


Рис. 6. Теоретические принципы подхода Groundhook:
m_A – масса кузова; z_A – вертикальное перемещение кузова; c_A – жесткость пружин кузова; k_A – постоянная демпфирования амортизатора; m_R – масса колеса (неподрессоренная масса); z_R – вертикальное перемещение колес; c_R – вертикальная жесткость шин; k_R – постоянная демпфирования шин, h – вертикальное перемещение от возбуждения, создаваемого дорогой; k_G – постоянная демпфирования воображаемого амортизатора, прикрепленного к дороге



Для контроллера Groundhook также делается разграничение случаев в зависимости от направлений движения колеса и кузова. Это разграничение случаев делается на основании следующих выражений:

$$(z_R - \dot{h})\,(z_R - z_A) \geq 0\,,$$

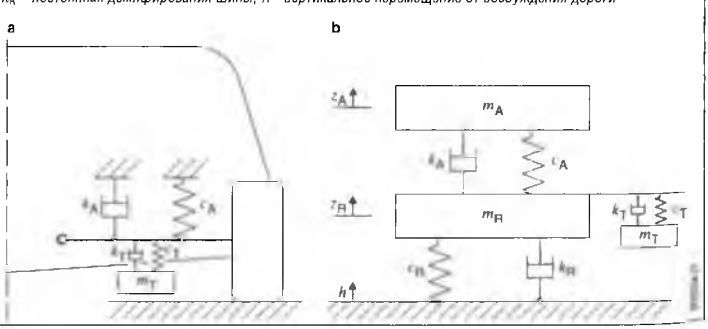
$$(z_R - \dot{h})\,(z_R - z_A) < 0\,.$$

Вибропоглотители

Для влияния определенным образом на свойства вибрации вибросистемы, состоящей из колеса и кузова, в некоторых случаях в шасси используются вибропоглотители (см. главу «Вибрации и колебания»).

В зависимости от конфигурации и расположения вибропоглотителя можно влиять на комфорт, акустику или безопасность движения. Различают пассивные и активные вибропоглотители. Пассивный вибропоглотитель – это масса, прикрепленная к шасси с помощью подрессоренных и амортизированных креплений (рис. 7). Поглощающий эффект создается соответствующими массовыми силами, а в случае с пассивными поглотителями ограничивается определенным диапазоном частоты. Эффективный диапа-

Рис. 7. Вибропоглотитель:
a – вибропоглотитель в шасси (схема); b – замещающая система;
k_A – постоянная демпфирования амортизатора;
c_A – жесткость пружин кузова;
k_T – постоянная демпфирования вибропоглотителя, c_T – жесткость пружин поглотителя;
m_T – масса поглотителя, m_A – масса кузова; z_A – вертикальное перемещение кузова; m_R – масса колеса;
z_R – вертикальное перемещение колеса; c_R – вертикальная жесткость шины;
k_R – постоянная демпфирования шины; h – вертикальное перемещение от возбуждения дороги

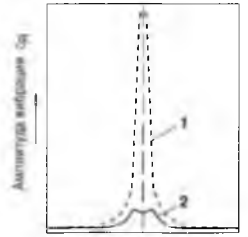


зон можно расширить с помощью активного поглотителя с активируемым актюатором.

При возбуждении вибросистемы вибрации и колебания основной системы принимаются должным образом скоординированным поглотителем, т.е. основная система вибрирует лишь незначительно, в то время как поглотитель поглощает большую часть энергии. На рис. 8 показан пример прогрессии амплитуды вибрации колеса с вибропоглотителями и без них. С использованием вибропоглотителя, настроенного на диапазон собственных частот колеса, может наблюдаться значительное уменьшение вибрационной амплитуды в соответствующем диапазоне частот.

Список литературы
[1] Heißing, B.; Ersoy, M. (Editors): Fahrwerkhandbuch. 1st Edition, Vieweg Verlag, 2007.
[2] Eckstein, L.: Aktive Fahrzeugsicherheit, ika/fka 2010.

Рис. 8. Амплитуда вибрации колеса как функция угловой частоты возбуждения с вибропоглотителями и без них:
1 – прогрессия без вибропоглотителя;
2 – прогрессия с вибропоглотителем;
ω_R – собственная угловая частота колеса



Подвеска колес

Базовые принципы

Колеса и кузов автомобиля соединяются подвеской. С одной стороны, подвеска колеса служит для позиционирования колеса относительно кузова таким образом, чтобы сохранялась возможность вертикального движения колеса относительно кузова и, с другой стороны, чтобы силы, действующие на колесо в точке его контакта с дорогой в горизонтальной плоскости, и создаваемый этими силами крутящий момент могли передаваться на кузов. На передней управляемой оси переднеприводного автомобиля, а также на задней оси у автомобилей с задним приводом необходимо обеспечить дополнительную управляемость колес.

Наряду с шинами, системой подвески и амортизаторов, массой кузова и отдельных колес, подвеска колес оказывает большое влияние на ходовые характеристики автомобиля, так как влияет на параметры оси автомобиля, имеющие отношение к динамике движения. Это, например, следующие параметры:

- ширина колеи;
- угол схождения (положительный или отрицательный);
- развал колес;
- угол продольного наклона оси поворота;
- смещение угла продольного наклона оси поворота в центре колеса;
- угол разнесения;
- смещение разнесения;
- смещение оси поворота колеса;
- плечо рычага возмущающей силы;
- положение продольной оси качения;
- положение поперечной оси качения;
- управление торможением и предотвращение проседания;
- продольная и поперечная эластичность.

Определения отдельных параметров подвески колес или автомобиля приведены в главе «Основные термины автомобилестроения».

Кинематика и эластокинематика

Во время эксплуатации автомобиля геометрия и кинематика подвески колес приводят к изменениям в параметрах подвески колес (например, угла продольного наклона оси поворота, положения продольной оси качения) и параметров положения (например, развал и схождение) соответствующего колеса. Это происходит, к примеру, в результате движений колеса в рамках вертикальной степени свободы, допускаемой подвеской колеса (т. е. при сжатии или отдаче амортизатора) или в результате движений рулевания у подвески с управляемыми колесами. На рис. 1 показаны примеры кинематических изменений углов развала и схождения колес при сжатии на длину Δz по сравнению с расчетным положением. Как правило, кинематические изменения положения колеса отображаются с помощью схем перемещения колеса при сжатии и отдаче амортизатора. Так называемые «перемещения колеса» для изменений углов развала и схождения, изображенных на рис. 1, а и 1, b показаны на рис. 1, с.

В связи с тем что кинематические изменения параметров подвески колеса и параметров положения колеса сильно влияют на ходовые характеристики автомобиля, большое значение приобретает правильная настройка и координация рулевого управления и кинематика подъема колеса.

Наряду с кинематическими изменениями параметров положения колеса в фазах сжатия и отдачи, силы и крутящий момент, влияющие на подвеску колес (например силы привода и торможения, боковые и вертикальные силы в точке контакта колеса с дорогой) в сочетании с эластичностью подвески приводят к дальнейшим изменениям положения колеса. Эластичность подвески колеса получается благодаря деформируемости отдельных компонентов подвески (например, рычагов) и подшипников, нагружаемых при воздействии сил и крутящего момента. По причинам, связанным с комфортабельностью езды и акустикой, используемые в современных подвесках крепления обычно являются эластичными (например, сайлент-блоки). На рис. 2 показан пример подвески с двумя сайлент-блоками, установленными на днище автомобиля; их эластичность при

воздействии продольной силы в точке контакта колеса с дорогой приводит к эластокинематическому изменению угла схождения колес.

Наряду с кинематическими изменениями положения колес, эластокинематические эффекты также влияют на ходовые характеристики автомобиля. Вот почему при координации кинематики и эластокинематики подвески обычно стремятся к тому, чтобы при воздействии сил и кинематические и эластокинематические эффекты дополняли друг друга.

Например, эластокинематическое рулевое управление используется в ряде современных задних подвесок для уменьшения реакций изменения нагрузки (например, путем увеличения положительного схождения колес при воздействии тормозных сил на задние колеса на внешнем радиусе поворота) [1]. Можно влиять на эластокинематические свойства подвески путем координации, к примеру, эластичности отдельных креплений или регулировки отдельных точек крепления.

Рис. 1. Кинематические изменения положения колеса в фазе сжатия амортизатора:
a – кинематическое изменение развала (вид сзади);
b – кинематическое изменение угла схождения (вид сверху);
c – перемещение колеса;
Δz – ход сжатия из расчетного положения;
$\Delta\gamma_{kin}$ – кинематическое изменение угла развала;
$\Delta\delta_{kin}$ – кинематическое изменение угла схождения

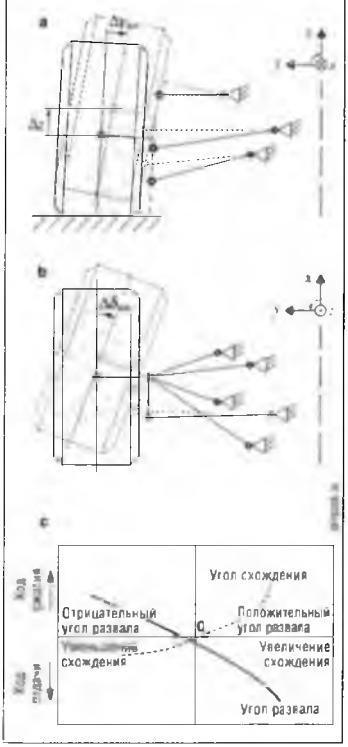
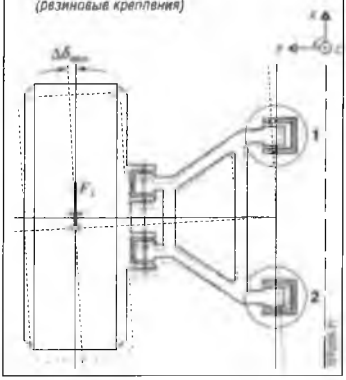


Рис. 2. Эластокинематическое изменение угла схождения из-за воздействия продольной силы:
F_x – продольная сила (сила торможения);
$\Delta\delta_{ekin}$ – эластокинематическое изменение угла схождения;
1 – эластичное смещение точки оси поворота 1 (резиновые крепления);
2 – эластичное смещение точки оси поворота 2 (резиновые крепления)



Основные категории подвесок колес

Существует большое количество различных типов подвесок. Они классифицируются в основном по типу конструкции. В первую очередь различают зависимую подвеску (зависимое управление колесами), подвеску с торсионной балкой и независимую подвеску (независимое управление колесами).

Зависимая подвеска

В случае с зависимой подвеской колеса соединены между собой сплошной жесткой осью, что приводит к взаимным влияниям на колеса. Зависимая подвеска используется на приводных и неприводных задних мостах тяжелых автомобилей (внедорожников, минивэнов, грузовиков). Однако иногда их прочная конструкция и большой клиренс означают, что используются также управляемые варианты на передних мостах (например, у внедорожников и грузовиков для бездорожья).

Управление независимой подвеской относительно кузова автомобиля можно реализовать разными способами. На автомобилях с листовыми рессорами управление обычно выполняется через рессорные листы (рис. 3, a). Существует также большое количество конструкций зависимой подвески, управляемых рычагами или тягами (рис. 3, b, 3, c и 3, d). Там, где используются рычаги и рычажные механизмы, выбираются статически неопределенные крепления, чтобы упростить связи на кузове и уменьшить требуемое пространство [3]. Подробные разъяснения отдельных вариантов осей см. в [2].

Основными преимуществами зависимой подвески являются простота и надежность конструкции, низкая стоимость, высокорасположенный центр продольной оси качения, высокий максимальный ход колеса и большой клиренс.

Однако зависимая подвеска имеет и ряд недостатков, обусловленных конструкцией: взаимное влияние колес, большая неподрессоренная масса, большое монтажное пространство и ограниченные возможности координации кинематических и эластокинематических коэффициентов.

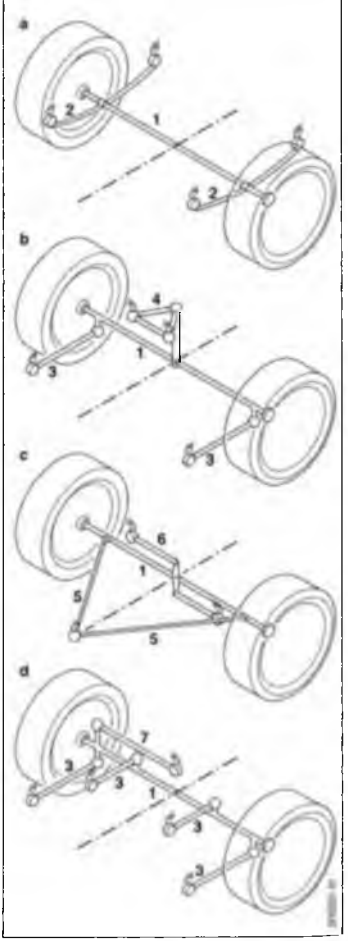


Рис. 3. Примеры конструкций зависимой подвески: *a – подвеска с продольными листовыми рессорами, b – продольные рычаги и А-образный рычаг, c – рычажный механизм Уатта и А-образный рычаг; d – продольные реактивные штанги и тяга Панара, 1 – зависимая подвеска; 2 – листовая рессора, 3 – продольный рычаг; 4 – А-образный рычаг, 5 – А-образный рычаг; 6 – рычажный механизм Уатта; 7 – тяга Панара*

Подвеска с торсионной балкой

В подвеске с торсионной балкой также имеет место механическое соединение колес. Однако, в отличие от зависимой подвески, эта связь не жесткая. Эластичность используемой торсионной балки допускает перемещение колес относительно друг друга. Торсионная балка образует поперечное соединение между двумя продольными рычагами, с которыми она прочно соединена. Продольные силы поглощаются продольными рычагами. Компенсирование поперечных сил поддерживается за счет повышения жесткости посредством торсионной балки. Чтобы гарантировать относительное перемещение между двумя колесами оси, торсионная балка должна иметь гибкую конструкцию. В зависимости от расположения торсионной балки различают оси с продольными рычагами, оси с П-образной балкой и полунезависимые оси (рис. 4).

Благодаря простоте и низкой стоимости конструкции полунезависимые оси широко используются на задних мостах переднеприводных автомобилей.

Преимуществами этой концепции являются небольшое монтажное пространство, небольшая подрессоренная масса, простота монтажа и снятия, стабилизирующий эффект торсионной балки, небольшие изменения ширины колеи угла схождения, а также хорошая сопротивляемость «клеванию» при торможении.

Эти преимущества компенсируются рядом недостатков, обусловленных конструкцией. взаимное влияние колес, плохая пригодность для ведущих мостов, высокие пики напряжения в точках перехода между продольным рычагом и торсионной балкой, возрастающая тенденция к избыточной поворачиваемости в случае воздействия боковых сил из-за деформаций рычагов, а также ограниченный потенциал оптимизации кинематики и эластокинематики.

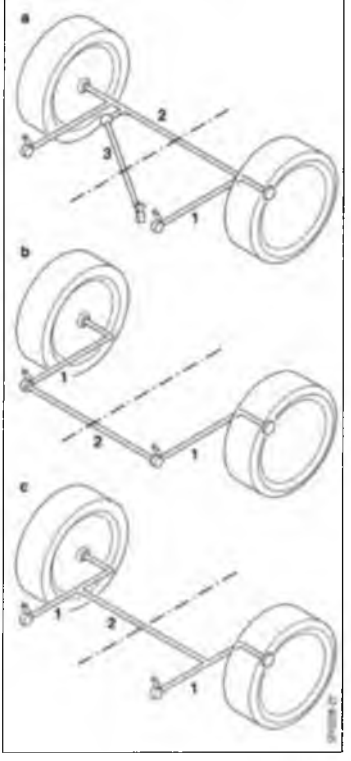
Оси с продольными рычагами

В случае осей с продольными рычагами (рис. 4, a) два держателя колес соединяются через торсионную балку, расположенную рядом с центром колеса. Как правило, боковой увод оси поддерживается дополнительным направляющим элементом (например, тягой Панара) [2]. Здесь очень много схожего с зависимой подвеской как в плане конструкции, так и в плане свойств.

Подвеска с П-образной балкой

Кинематические свойства подвески с П-образной балкой (рис. 4, b), напротив, схожи со свойствами подвесок с продольными рычагами. Торсионная балка располагается на высоте точек поворота продольных рычагов. Использование торсионной балки

Рис. 4. Примеры конструкций подвесок с торсионной балкой:
a – подвеска с продольными рычагами и тягой Панара; b – подвеска с П-образной балкой, c – полунезависимая подвеска; 1 – продольный рычаг; 2 – торсионная балка; 3 – тяга Панара



сильно упрощает монтаж продольных рычагов по сравнению с независимой подвеской.

Полунезависимая подвеска

По сравнению с подвеской с П-образной балкой торсионная балка у полунезависимой подвески (рис. 4, с) находится не на высоте точек поворота рычагов, а смещена назад. Это прежде всего улучшает компенсирование поперечных сил по сравнению с подвеской с П-образной балкой.

Независимые подвески

Наряду с полунезависимыми подвесками – например, на задних мостах переднеприводных автомобилей – современные автомобили имеют независимую подвеску, где каждое колесо отдельно соединено с кузовом в соответствии с нужной степенью свободы перемещений. Колесо здесь присоединяется с помощью опоры и соответствующего количества рычагов

Конструкция (например, двухточечные рычаги или А-образные рычаги) и расположение рычагов (продольные, поперечные или диагональные) и соединяющих креплений определяют кинематические и эластокинематические свойства подвески. Конструкция отдельных рычагов определяет их количество, необходимое для уменьшения степеней свободы перемещений колеса.

Количество рычагов часто используется в качестве классификации типов подвески (например, пятирычажная независимая). Получающийся тип пространственного перемещения (кинематика) колеса при сжатии или отдаче амортизатора также часто используется для классификации независимых подвесок [1], [3]. В зависимости от типа перемещения опоры колеса, здесь различают горизонтальные, сферические и пространственные независимые подвески [1], [3].

Доля независимых подвесок в современных автомобилях неуклонно растет. По сравнению с зависимыми и полунезависимыми подвесками независимые подвески имеют ряд преимуществ. Например, отсутствует взаимное влияние колес, высокий потенциал кинематической и эластокинематической оптимизации и, в некоторых случаях, невысокие требования к пространству и небольшая неподрессоренная масса.

Однако независимые подвески имеют и ряд недостатков. В некоторых случаях они усложняют конструкцию, увеличивают стоимость, максимальный подъем колеса небольшой, а процесс конфигурации и координации более сложный.

Существует много различных конструкций независимых подвесок. Базовые принципы выбранных конструкций будут кратко описаны в следующем разделе, а их устройство показано на схемах. Более подробные описания отдельных конструкций и других независимых подвесок и конкретные примеры конструкций см. в [2].

Независимая подвеска с продольными рычагами

В независимой подвеске с продольными рычагами колесо соединяется к кузовом через одиночный рычаг, расположенный в продольном направлении (рис. 5, а). Продольный рычаг передает как продольные, так и поперечные силы, то есть на крепления воздействуют значительные силы, и крепления должны иметь соответствующую конструкцию

Ось вращения рычагов проходит параллельно поперечной оси автомобиля. Преимущества этой подвески обычно заключаются в малом монтажном пространстве и невысокой стоимости. Недостатками являются ограниченные возможности оптимизации кинематики, мгновенный центр крена расположен на высоте дороги, что вызывает большой вращающий момент на поворотах, а также значительные нагрузки на рычаги и их крепления.

Независимая подвеска с диагональными рычагами

Как и в независимой подвеске с продольными рычагами, колесо в независимой подвеске с диагональными рычагами соединяется к кузовом через одиночный рычаг. Однако для улучшения противодействия продольным и, прежде всего, поперечным силам рычаг располагается диагонально (рис. 5, b), оставляя больше места между точками крепления. Для достижения более благоприятных кинематических свойств в современных подвесках ось поворота рычага располагается диагонально как в проекции к вертикальной плоскости автомобиля (угол крыши), так и в проекции к дороге (V-образный угол) [1].

Независимая подвеска с двойными поперечными рычагами

В независимой подвеске с двойными поперечными рычагами колесо соединяется

Рис. 5. Независимая подвеска с продольными и диагональными рычагами:
a – независимая подвеска с продольными рычагами; b – независимая подвеска с диагональными рычагами;
1 – продольный рычаг;
2 – диагональный рычаг

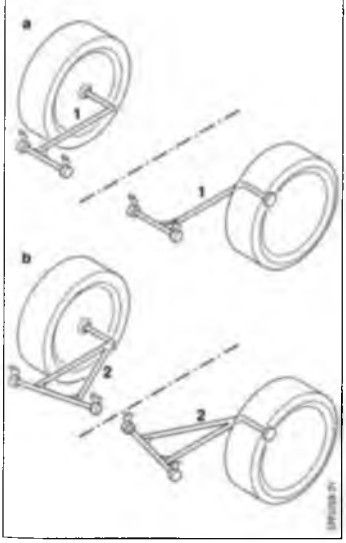
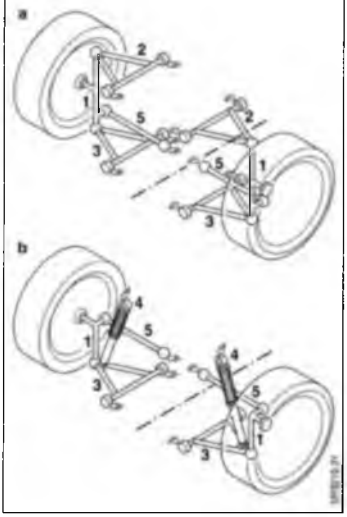


Рис. 6. Независимая подвеска с двойными поперечными рычагами и пружинными стойками:
a – независимая подвеска с двойными продольными рычагами; b – независимая подвеска с пружинными стойками; 1 – опора колеса;
2 – верхний А-образный рычаг; 3 – нижний А-образный рычаг; 4 – амортизационная стойка с пружиной; 5 – рулевая тяга



с кузовом через два А-образных рычага. Один рычаг располагается под центром колеса, а другой – над центром (рис. 6, а), что позволяет подвеске компенсировать все силы и крутящие моменты, воздействующие на колесо. Как правило, большие силы, воздействующие на сочленения, означают, что поперечные рычаги соединяются с кузовом не напрямую, а крепятся к подрамнику, соединяющему между собой обе подвески, снимая с кузова нагрузку внутренних сил.

Посредством адаптации креплений и конструкции рычагов независимые подвески с двойными поперечными рычагами обеспечивают очень большой потенциал оптимизации кинематики [2]. В зависимости от расположения осей поворота рычагов, достигается горизонтальная, сферическая или пространственная кинематика подвески [3]. Недостатком независимых подвесок с двойными поперечными рычагами является более высокая стоимость, им также требуется больше пространства.

Независимая подвеска с пружинными стойками

Кинематика подвески с пружинными стойками соответствует кинематике независимой подвески с поперечными рычагами, в которой верхний поперечный рычаг заменен скользящей направляющей (рис. 6, b). Эта скользящая направляющая соответствует пружинной стойке в других подвесках (в случае комбинированной амортизационной стойки с пружиной) или амортизационной стойке (в случае раздельного расположения пружины и амортизатора), где корпус стойки жестко соединен с опорой колеса. При этой конструкции шток амортизатора также выполняет функцию направления колеса.

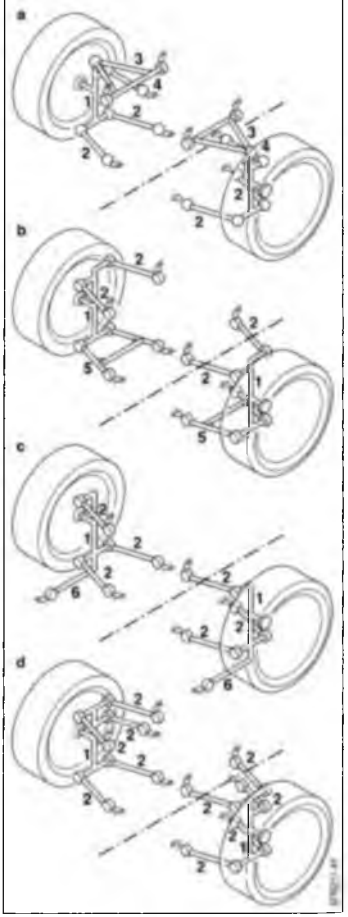
Плоскость нижних рычагов подвески с пружинными стойками обычно образуется двумя двухточечными рычагами (радиальными) или А-образным рычагом. В случае подвески МакФерсона изначально нижний А-образный рычаг образовывался из поперечного рычага и стабилизатора. Сегодня же другие типы подвесок с пружинными стойками также называют подвеской МакФерсона.

Преимуществами подвески с пружинными стойками являются, прежде всего, низкая стоимость конструкции и небольшое монтажное пространство на высоте колесных осей, которые можно использовать, особенно в переднеприводных легковых автомобилях, с поперечным расположением силовых агрегатов. Другими преимуществами является малая стоимость и масса конструкции, простота установки и сборки, а также высокая степень интеграции. Однако, в плане кинематики, подвеска с пружинными стойками дает чуть меньше свободы для конфигурации по сравнению с независимой подвеской с двойными поперечными рычагами.

Независимая многорычажная подвеска

Подвеску с четырьмя или пятью рычагами обычно называют многорычажной. Многорычажная подвеска получается, например, из разделения А-образного рычага на два двухточечных рычага у подвески с двойными поперечными рычагами (рис. 7, a). Разделение трехточечных рычагов и использование независимых двухточечных рычагов обычно дает больше свободы для конфигурации кинематических и эластокинематических свойств оси. С одной стороны, это увеличивает оптимизацию оси в плане требований к комфорту и безопасности движения. С дру-

Рис. 7. Примеры конструкции многорычажных независимых подвесок:
a – независимая многорычажная подвеска, b – независимая подвеска с трапециевидными рычагами; c – независимая подвеска с управляющим ребром; d – независимая пятирычажная подвеска; 1 – опора колеса; 2 – двухточечный рычаг; 3 – А-образный рычаг; 4 – рулевая тяга; 5 – трапециевидный рычаг; 6 – управляющее ребро



гой стороны, отчасти сложная конструкция повышает затраты на конфигурацию и координацию подвески.

Независимая подвеска с трапециевидными рычагами

Независимая подвеска с трапециевидными рычагами (рис. 7, b) – это особая форма многорычажной независимой подвески, в основном используемой на задних осях. Нижняя плоскость образована трапециевидным рычагом, имеющим две точки присоединения со стороны колеса и ось поворота со стороны кузова. Это означает, что нижний рычаг задает всего три степени свободы колеса. Две других степени свободы устраняются путем двух двухточечных рычагов, расположенных таким образом, что остается только нужная степень свободы при перемещении колеса.

Независимая подвеска с управляющим ребром

Еще одной конструкцией многорычажной независимой подвески является ось с управляющим ребром, на которой колесо направляется одним продольным и тремя поперечными рычагами (рис. 7, c). Продольный рычаг (рычаг с управляющим ребром) соединяется с кузовом таким образом, чтобы он мог поворачиваться, и жестко соединяется с опорой колеса. Как правило, он имеет эластичные свойства для обеспечения кинематических изменений ширины колеи и развала колес. Боковые силы компенсируются с помощью трех двухточечных поперечных рычагов, обычно располагающихся в двух плоскостях (одна выше и одна ниже центра колеса). Расположение и ориентация поперечных рычагов определяет кинематические свойства подвески.

Независимая пятирычажная подвеска

Подвеска с полностью отсоединенными рычагами требует пять отдельных двухточечных рычагов для уменьшения движения колеса до желаемой вертикальной степени свободы (рис. 7, d). Пятирычажные задние подвески обычно называют многорычажными, а на передних осях их называют четырехрычажными с рулевой тягой [2].

Список литературы

[1] Eckstein, L.: Вертикальная и поперечная динамика легковых автомобилей, ika/fka 2010.

[2] Heißing, B; Ersoy, M. (редакторы): Справочник по ходовой части. Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

[3] Matschinsky, W.: Направляющая система подвески автомобиля. Springer-Verlag, 2007.

Колеса

Будучи соединительным элементом между колесным диском и шиной, обод является элементарной составной частью системы «дисковое колесо». Все относящиеся к автомобилю и его осям задачи выполняются через колесный диск, например, монтаж колеса, центровка и передача динамических сил между автомобилем и поверхностью дороги. На рис. 1 изображена фундаментальная конструкция колеса с наиболее важными элементами.

Размер колеса в основном зависит от требований тормозной системы, компонентов оси и размера шин.

Колеса легковых автомобилей

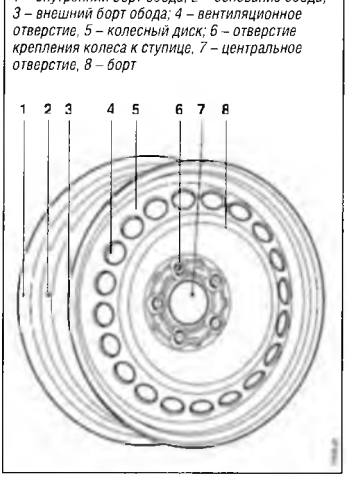
Обозначения

Типичное обозначение колеса 6½ Jx16 H2 ET30:

6½ – ширина обода в дюймах;
J – форма борта обода;
x – разделительный знак;
16 – диаметр обода в дюймах;
H2 – наличие хампов (кольцевых выступов) на внутренней и внешней посадочных полках обода;
ET30 – вылет колеса – расстояние от средней плоскости обода до привалочной плоскости диска (в данном случае – 30 мм).

Обозначение и соответствующие размеры с разрешенными допусками предписаны к обязательному использованию и стандартизируются всемирно признанными организациями по стандартизации, такими как ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organization) и ISO (International Standards Organization) для согласования размеров колес и шин.

Рис. 1. Конструкция колеса:
1 – внутренний борт обода, 2 – основание обода, 3 – внешний борт обода; 4 – вентиляционное отверстие, 5 – колесный диск; 6 – отверстие крепления колеса к ступице, 7 – центральное отверстие, 8 – борт



Определения

Наиболее важные термины для функционирования и проектирования колеса:
- диаметр обода (обозначение);
- окружность обода (измеренное значение);
- ширина обода (от борта до борта);
- диаметр центрального отверстия (конструкция);
- вылет колеса;
- диаметр окружности под отверстия крепления колеса к ступице;
- количество монтажных отверстий;
- конструкция контактной поверхности монтажных отверстий крепления колеса к ступице (например, сферическая, коническая, под плоскую головку);
- контактная поверхность колеса.

Монтаж колеса

Конструкция колеса и элементов крепления должны отвечать требованиям безопасности движения в любых условиях эксплуатации. Силы на колесе как результат динамической силы, сил торможения, нагрузки на колесо и позиционирования колеса должны поддерживаться общей системой крепления, без ухудшения пределов усталости и функций компонентов колеса и оси. Очень важна тщательная координация параметров трения и геометрии колесных болтов или гаек и контактной зоны колеса при определении моментов затяжки при инженерных расчетах и на практике.

Должны достигаться и соблюдаться продольные силы крепления колесных бол-

тов, оказывающие решающее влияние на долговечность болтового соединения, как новых, так и повторно используемых, во всех динамических режимах эксплуатации. Геометрическая конфигурация окружностей под отверстия крепления колеса к ступице, количества и размера элементов крепления зависят от потребностей каждого автопроизводителя.

Варианты конструктивного исполнения ободов

В зависимости от предназначения и конструкции шины существует целый ряд различных профилей ободов (рис. 2):

- с утопленным центром (в легковых автомобилях);
- с плоским основанием (особые области применения, составные ободы);
- для особых колес и шин (например, PAX, TRX, CTS, EH2).

Наиболее часто используемые выражения, описывающие конструкцию обода:

- Борт обода (форма борта обода): форма борта обода описывается буквенным обозначением, например J, K, JK, B и т.д. Размеры высоты борта и ширины профиля различны; варианты использования основаны на предназначении (грузоподъемность, расчетная мощность, условия эксплуатации). Из-за способности держать шину высота борта определяет глубину монтажного ручья. Наиболее распространенная форма – J-образный борт. Борт B встречается на небольших автомобилях и в системах надувных запасных шин. Борты K и JK сейчас используются редко; раньше они использовались на тяжелых, комфортабельных автомобилях высшего ценового сегмента.

Рис. 2. Профили ободов колес легковых автомобилей:
a – легковые автомобили, обод с утопленным центром (стандартный обод); b – EH2+ обод (расширенный хамп); c – обод PAX (франц. Pneu Accrochage, X = синоним радиальной технологии шин Michelin); d – обод CTS (система шин Conti); 1 – борт обода; 2 – конусная посадочная полка обода; 3 – хамп; 4 – утопленный центр, M – ширина обода; D – номинальный диаметр, D_H – диаметр хампа

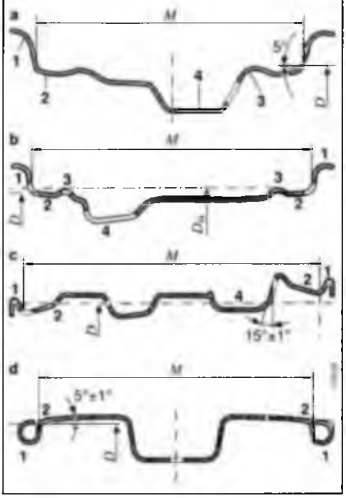
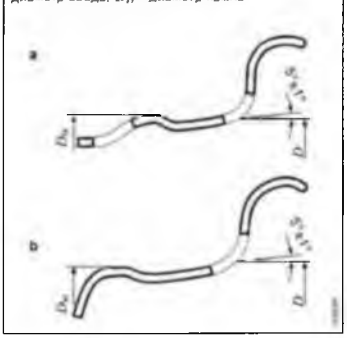


Рис. 3. Формы хампа:
a – хамп; b – плоский хамп, D – номинальный диаметр обода, D_H – диаметр хампа



- посадочная полка обода: описывает зону контакта шины с ободом. В этой зоне шине придается правильное положение для нормальной эксплуатации. Здесь передаются движущие силы. Воздушная камера шины герметизируется в посадочной полке обода;
- основание обода: это область обода, герметизирующая воздушную камеру шины;
- с углублением по центру (глубокий обод): это необходимая форма основания обода для монтажа основания шины при установке и снятии шины;
- хамп (кольцевой выступ): хамп – это приподнятый по всей окружности кольцевой выступ в области посадочной полки обода; в случае низкого давления в шине он предотвращает соскакивание шины с посадочной полки обода. Предпочтительно располагать хамп на внутренней и внешней посадочных полках (рис. 3). Основные отличия существуют между стандартным хампом (H) и плоским хампом (FH). Недавно в стандарты включен расширенный хамп (EH2), используемый в некоторых случаях, особенно в системах «run flat» (дающих возможность продолжить движение на проколотой шине).

Материалы

Используются две основные категории материалов:
- листовой прокат из различных видов конструкционной стали;
- легкие сплавы (алюминиевые, магниевые).

Сталь

Самый дешевый в целом вариант исполнения колес. Высокая степень автоматизации при изготовлении и жесткие допуски для базового материала обеспечивает рациональное и при этом высококачественное производство. Использование высококачественной стали с высокой механической прочностью, хорошей пластичностью и свариваемостью обеспечивает потенциал значительного снижения массы.

Алюминий

Как альтернатива стали, алюминий обладает хорошей ковкостью и свариваемостью. Высокая степень деформационного упрочнения на стадии отливки уменьшает расход материала и толщину стенок, что позволяет изготавливать одни из самых легких колесных дисков. В целом затраты на производство выше, и стоимость материала сравнительно высока, что не позволяет расширять спектр областей применения.

Легкие сплавы

В основе большинства легких сплавов – алюминиевые сплавы различного состава. Сплавы бывают литые и ковкие. Благодаря более простой и более изменяемой структуре литейных форм наиболее распространены литые сплавы Прочностные характеристики литых и кованых сплавов могут быть значительно улучшены специальной тепловой обработкой заготовок. Это преимущество используется в ответ на требования к сопротивлению нагрузкам при эксплуатации автомобиля с минимальным расходом материала. Вообще, колеса без тепловой обработки используются для основных категорий автомобилей по причине стоимости; низкая прочность материала обычно компенсируется утолщением стенок.

Ковкие сплавы

Ковкие сплавы обладают хорошей пластичностью. Это предполагает хорошую однородность структуры базового материала и наличие лишь минимума примесей и дефектов. Это достигается путем использования непрерывного процесса литья, где базовый материал – а в производстве колесных дисков это спицы с круговой секцией – создается путем непрерывного литья и интенсивного охлаждения. В процессе производства колес, имеющих конструктивные элементы в виде спиц, формируется характерная ориентация волокон. Это означает, что структурный состав материала выравнивается в направлении потока и обычно имеет упрочняющий эффект, сравнимый с армированием. Это обстоятельство обычно используется для уменьшения толщины стенок и экономии материала.

Хотя сплавы магния и не нашли широкого применения, они используются в отдельных случаях для автомобилей особого назначения и спорт-каров.

Пластмассы

Использование пластмассы как материала для колес пока находится на стадии разработки, в частности, из-за недостаточной прочности при высоких температурах и сложностей в монтаже и изготовлении колес. В частности, термостойкость и непредсказуемые перспективные свойства означают, что в настоящее время не имеет особого смысла использовать пластмассы в качестве материала для таких связанных с безопасностью компонентов, как колеса.

Процесс производства стальных колес

Стальные колеса изготавливаются на автоматизированных производственных линиях. Диск создается после точной штамповки из листов стального проката заданной толщины с небольшими допусками, в 8–10 этапов деформации на многопозиционных прессах под давлением около 3000 т. Ободья также обрезаются на точную длину из металлических пластин, изгибаемых в цилиндры и свариваемых в точке стыка. Для создания готового обода из закрытого цилиндра используются различные прокатные операции. При большом количестве колес используется поточная отливка для адаптации толщины стенок и распределения материала в профиле обода к нагрузкам, что еще больше снижает массу. В завершение можно сказать, что обод колеса калибруется с очень жесткими допусками на биение, диски впрессовываются в обод полностью автоматизированно и ввариваются в обод с множеством узких швов.

Процесс изготовления стальных колес настолько точен, что готовое колесо может быть направлено в покрасочный цех без механической доработки. Там, оно обязательно подвергается катодному грунтованию с погружением и, в зависимости от требований, на него наносят дополнительный, визуально привлекательный финишный слой.

Особые материалы и методы производства открывают огромный потенциал для снижения массы. На повестке дня сейчас и прессованное алюминиевое колесо – это самая легкая конструкция, с целым рядом различных вариантов поверхностей и дизайна. Другой потенциал кроется в прокатке колес (изменяемая толщина стенок от центра колеса к внешнему стыку колеса). По большому счету основной процесс производства идентичен процессу производства стальных колес.

Базовым материалом для монолитного «разделяемого диска» является круглый диск из алюминиевой пластины (круглая заготовка). Толщина диска должна быть такой, чтобы покрывалась нужная толщина стенок и в диске, и в ободе. Понятие «разделяемый диск» происходит из производственного процесса, где после придания диску формы, подходящей под обод, верхний край раскрывается и раскатывается для создания обода.

«Разделяемый диск» также имеет большой потенциал для снижения массы в зависимости от предполагаемого использования и размера колеса. Однако вскоре он достигнет своих технико-экономических пределов.

Ковка

Базовым материалом для кованого колеса является разделенный диск из секции непрерывного литья – обычно это цилиндр диаметром около 300 мм. При нагреве до температуры ковки этот диск фасонируется гидравлическими прессами в несколько последовательных этапов в заготовку с готовым дизайном и прикованным материалом в форме кольца.

Как и в случае с разделяемым колесным диском, внешний кольцеобразный диск также разделяется и раскатывается, образуя обод, после чего заготовка отправляется на обработку.

Для производства легких дисков с ограниченными вариантами дизайна, легче поддающимися ковке процесс сокращается лишь до нескольких операций ковки.

Особый вид ковки – создание кованой заготовки в виде толстостенного цилиндра, где основание представляет собой контур дизайна и внутренней стороны колеса. При больших затратах на обработку дизайн обычно на 100% фрезеруется, а основание обода обрабатывается.

Литье

Наиболее распространенный метод – литье под низким давлением. Здесь расплавленный алюминиевый сплав размещается под мульдой. Мульда и тигель соединяются между собой через питающую трубку. После закрывания мульды атмосферное давление в тигеле повышается примерно до 1 бар, что

заставляет расплавленный металл в питающей трубке подниматься и заполнять мульду.

Теплота плавления вытягивается в процессе отверждения через точно выверенные охлаждающие каналы в мульде. Охлаждение и удаление тепла в процессе отверждения также являются решающими факторами для качества литья. При последующем процессе рентгеноскопии, который большей частью автоматизирован, анализируются и отделяются заготовки с дефектами литья, невидимыми снаружи, например, пористостью или усадочными раковинами (полости, разрушение материала) согласно заданным параметрам перед отправкой заготовок на оставшиеся этапы производственного процесса.

В процессе «поточной отливки» литая заготовка получается способом, аналогичным используемому в ковке. Это означает, что приливаемое внешнее кольцо раскатывается, образуя обод в рамках отдельной операции на специальном прокатном станке, и затем обрабатывается. Этот процесс позволяет упростить литье и улучшить свойства материала – в частности, для колес диаметром более 18 дюймов.

Процесс «жидкой штамповки» использует преимущества литья под давлением. Точно отмеренное количество расплавленного алюминия под высоким давлением вливается в мульду при точно определенных параметрах литья. Большим преимуществом является высокая скорость отверждения с положительным эффектом для структуры материала. Другими преимуществами являются значительно более низкие затраты на обработку (и, стало быть, меньший расход материала) относительно высокий выход и более длительный срок службы мульды. Этот процесс литья используется в отдельных случаях, но требует специальных, относительно сложных литейных машин и мульд.

Конструктивные особенности

В случае со стальными колесами диск и обод свариваются между собой. В случае кованых и литых легкосплавных колес преобладает монолитный вариант. Многоэлементные конструкции колес, а также колеса, выполненные из разных материалов, применяются только в особых случаях и для гоночных автомобилей. К примеру, здесь используется возможность стандартизированных ободных колец и дисков для создания большого количества различных размеров колес. Ободья для колес легковых автомобилей почти всегда имеют центральное углубление с двойным хампом H2 (очень редко с плоской частью FH), конусную посадочную поверхность (с наклоном конических полок 5°) и J-образный борт. Менее высокие борта с профилем B часто применяются на колесах малолитражных автомобилей; борта с большим профилем JK и K сейчас используются редко, и то только на тяжелых грузовиках.

Технология пустотелых спиц с зернами песка или керамики, остающимися в колесе, также дает хорошие возможности для снижения массы, но требует подходящего оформления и специального производственного оборудования.

«Структурные колеса» используются, помимо прочего, в качестве запасных колес или основных колес с пластмассовыми колпаками. При отсутствии ограничений по стилю, здесь цель – использовать минимальное количество материала для гарантирования безопасности эксплуатации, а также оптимизировать затраты на эти колеса.

Специальные системы колес/шин

Более поздними разработками ободьев, изготавливаемых ограниченными сериями, являются ободья TR (в метрических размерах). Они были разработаны компанией MICHELIN для использования с соответствующими шинами TRX и обеспечивают больше пространства для тормозов. Ободья, изготавливаемые компанией DUNLOP с канавкой Denloc, также требуют специальных шин; при низком давлении в шине и в случае падения давления система должна предотвращать соскакивание шины с обода, повышая безопасность и мобильность. Система TD (TRX-Denloc) требует для своего применения соответствия колеса и шины. Вопреки общепринятой практике, во всех трех вышеуказанных колесах нельзя использовать другие варианты конструкции ободов или шин или использовать их можно очень ограниченно.

Полностью новой разработкой является колесо с зажимом шины снаружи обода (CONTINENTAL CTS). Эта концепция позволяет значительно увеличить конструктивный запас для тормозных систем и осей и продолжить движение со спущенными шинами

на ограниченной скорости на расстояние до 100 км и более. Это может снять необходимость в запасном колесе. Эта система тоже пока не прижилась на рынке.

Для экономии места и, в определенной степени, массы изначально в США и все больше и больше в Европе в качестве запасного колеса предлагается надувная запасная шина (например, складывающиеся шины, мини-запаска). Все системы надувных запасных шин снабжаются шинами специальной конструкции, эксплуатационные свойства которых подходят только для движения в аварийном режиме и с ограниченной скоростью (около 80 км/ч). Их преимущества являются предметом споров, но популярность растет.

Конструктивные критерии

Конструктивные критерии колес для легковых автомобилей:

- долговечность;
- хорошая поддержка для охлаждения тормозов;
- надежный монтаж колеса;
- низкая концентричность;
- не занимает много места;
- хорошая защита от коррозии;
- малая масса;
- низкая стоимость;
- беспроблемная установка шины;
- хорошая посадка шины;
- хорошая посадка балансировочного груза;
- привлекательный дизайн (особенно в случае легкосплавных дисков);
- в настоящее время растет количество требований к аэродинамике автомобиля (значение c_d).

Колеса обычно монтируются на автомобиль с помощью болтов или гаек (от трех до пяти). Тип контактной поверхности этих болтов/гаек зависит от изготовителя автомобиля. Правильность установки колеса достигается центровкой колеса на ступице с помощью центрирующего буртика. В настоящее время на гоночных автомобилях почти исключительно используются колеса, монтируемые с центральной гайкой и запирающими штырями.

Для улучшения внешнего вида в основном используются декоративные колесные и ступичные колпаки, прикрепляемые к колесам с помощью легкосъемных эластичных удерживающих пружинных элементов (они используются главным образом на стальных дисках). В редких случаях применяются также болтовые крепления. Они могут достигать дополнительных эффектов, таких как уменьшение значений c_d и улучшение вентиляции колес для снижения температуры колесных подшипников и тормозной жидкости. Наиболее часто используемый материал для колесных колпаков – термостойкая пластмасса, например, полиамид 6. Однако в некоторых случаях также используются алюминий и штампованная нержавеющая сталь.

Напряжение и проверка колес

Крайне изменчивые и сложные состояния нагрузки в колесе, как компоненте в сочетании с широким спектром условий эксплуатации, требуют особых испытаний на долговечность для обеспечения долговечности колеса при приемлемых затратах. Вообще, динамические испытания проводятся в испытательных лабораториях на стандартизированной аппаратуре, при этом моделируется ситуация дорожной эксплуатации, близкая к реальной, и достигается хорошая корреляция результатов испытаний с дорожной эксплуатацией. Требования законодательства отдельных стран регламентируют специальные испытания как необходимые, например, в случае с легкосплавными колесами – симулирование бокового удара.

Критическими зонами на стальном диске, в частности, являются зоны вокруг сварных швов, монтажные отверстия, борт и вентиляционные отверстия. Условия эксплуатации в каждом случае, например, при движении по прямой и прохождении поворотов, создают различные картины повреждений в области сварного шва на впадине с центральным углублением и в колесном диске. Испытания качества материала и сварных соединений, а также поверхностные испытания дополняются испытаниями прочности и показывают необходимость в оптимизации изготовления колес.

Легкосплавные колеса проходят аналогичные испытания, но, в отличие от стальных дисков, большее разнообразие параметров материала, производства и дизайна означает значительно более высокий уровень требований. Это предотвращает преждевременные отказы из-за отклонений в качестве материала и в производственном процессе. Макси-

мальное напряжение возникает в основном на задней стороне колеса в опорной структуре ребер и спиц, в редких случаях – на лицевой стороне.

Качество материала и обработки оказывает большое влияние на долговечность. Неадекватные физические величины, такие как эластичность (расширение) и предел прочности на разрыв, могут быть вызваны плохим подводом тепла при литье или тепловой обработке. Это ведет к появлению пористости и усадочных раковин и дефектам формирования структуры. Задиры, возникающие в зонах высокого напряжения при машинной резке, представляют собой предварительные повреждения, схожие с зазубринами и часто дают начало появлению трещин. Необходимо тщательное, машинное удаление заусенцев в этих зонах или специальные конструктивные контрмеры, например, обильно формованные радиусы.

Колеса грузовых автомобилей

Колеса грузовых автомобилей технологически очень сложны. В то время как колеса автомобилей «Формулы 1» «заточены» на максимальную скорость, колеса грузовых автомобилей перевозят большой тоннаж при одновременно высокой скорости. К примеру, в Европе грузовики дальнего следования перевозят 40 тонн груза на скорости 80 км/ч

При определении минимального размера шин для оси грузовика необходимо всегда исходить из конструктивно обусловленной допустимой нагрузки на ось и максимальной скорости. Основными функциями колеса являются принятие нагрузки автомобиля и сил воздействия дорожного полотна, передача крутящего момента с осей на шины и принятие и передача сил торможения и ускорения, а также боковых сил при прохождении поворотов.

Обод

В ежедневном использовании понятия «обод» и «колесо» часто путают. Понятие «обод» часто используют, когда на самом деле имеется в виду целое колесо. Обод – это радиально крайняя внешняя часть колеса (кроме шины), которая служит для монтажа и герметизации шины. Кроме того, обод является фундаментальным соединительным элементом между диском колеса и шиной. Все типичные задачи для грузовиков, такие как монтаж колеса, центровка и передача



Рис. 4. Конструкция колеса грузового автомобиля *(источник: MAN Nutzfahrzeuge Gruppe):*
1 – обод, 2 – колесный диск, 3 – монтажные отверстия; 4 – центральное отверстие, 5 –вентиляционные отверстия

динамических движущих сил, выполняются колесным диском.

Главное требование к ободу

Чем больше передаваемая нагрузка и грубее дорога, тем важнее учитывать следующие – иногда противоречащие друг другу – требования к конструкции обода. Высокая грузоподъемность должна достигаться путем проектирования колеса соответствующей формы и использования оптимальных материалов. Для повышения безопасности движения совершенно необходима высокая усталостная прочность. Малая масса колеса оптимизирует полезную нагрузку и необходима, поскольку колесо, как неподрессоренная, вращающаяся масса, оказывает влияние на всю вибросистему автомобиля в целом.

Стальные ободья

Современные стальные ободья большей частью изготавливаются из стали горячего проката с высоким пределом текучести при растяжении. Конструкция представляет собой колесо (рис. 4), состоящее из собственно обода и колесного диска. Обе части свариваются между собой внутренними поверхностями. Расположение и тип этих сварных швов выбираются таким образом, чтобы обеспечить высокую усталостную прочность. Колесо крепится к ступице болтами, вставляемыми в монтажные отверстия. Ступица центрует колесный диск с помощью центрального отверстия. Вентиляционные отверстия и щели в колесном диске с одной стороны служат для уменьшения массы, а с другой – для вентиляции тормозной системы и улучшения общего вида. Стальные диски очень прочные.

Строение обода

Обод состоит из следующих элементов (рис. 5). Борт обода выполняет роль бокового упора для бортовой проволоки шины и поглощает силы, возникающие под действием давления шины и осевой нагрузки шины. Посадочная полка обода центрует шину в радиальном направлении и поглощает, в частности, силы, создаваемые весом автомобиля. В зависимости от типа используемого обода V-образные посадочные полки располагаются под углом 5 или 15°. Кант увеличивает высоту по всей окружности посадочной полки, чтобы бортовая проволока бескамерной шины надежнее сидела на ободе при низком давлении. Основание обода соединяет посадочные полки с обеих сторон и может принимать форму плоского основания в многоручьевых или глубокого основания в одноручьевых ободах.

Типы конструкций ободов

Типы конструкций ободов (рис. 6) и их размеры зависят от шины предназначения шины. Могут использоваться следующие различные типы ободов.

Обод с утопленным центром (рис. 6, a) состоит из одной части. Основание обода углублено для монтажа шины. Размер колеса обозначается как «x». Обод с утопленным центром используется на легких грузовиках

Коническая 15° посадочная полка обода (рис. 6, b и 6, c) состоит из одной части. Основание обода углублено на 15° для монтажа шины. Размер колеса обозначается как «x». Коническая 15° посадочная полка обода с прогнутым основанием требуется для реализации преимуществ бескамерной шины, в том числе и на тяжелых грузовиках.

Коническая 5° посадочная полка обода (рис. 6, d) состоит из нескольких частей. Тот факт, что обод состоит из нескольких частей, означает необходимость использования камеры. Основание обода углублено на 5°. Размер колеса обозначается как «–». Шина удерживается с одной стороны монтируемой комбинацией боковины и стопорного кольца. Преимущества этих систем ободов проявляются при замене колес. Однако они тяжелы и не имеют таких же хороших ходовых свойств, как у одноручьевых ободов.

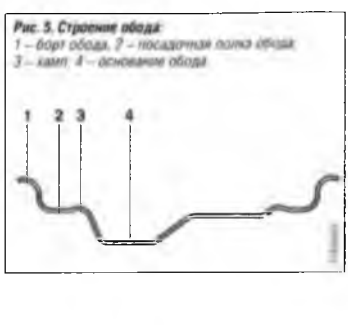


Рис. 5. Строение обода:
1 – борт обода; 2 – посадочная полка обода; 3 – кант; 4 – основание обода

Размер обода

Базовый размер обода у грузового автомобиля на диске с конической 15° посадочной полкой составляет в показанном примере 22,5×8,25 дюйма. Ширина обода – это внутренний размер между бортами обода (рис. 7). Высота борта – это внутренняя высота борта обода. Номинальный диаметр – это расстояние от одной посадочной полки обода до другой.

Колесный диск

Колесный диск соединяет обод со ступицей. Из монтажных размеров колеса – центрального отверстия, диаметра окружности под отверстия крепления колеса к ступице, отверстий под болты и вылета обода (рис. 7) – последний является ключевым для движения шины во всех положениях колеса. Вылет обода равен нулю, когда центр обода совмещается с поверхностью крепления колесного диска к ступице. У двойных шин их двойной промежуток вычисляется на основе двойного вылета обода плюс двойная толщина колесного диска.

Центрирование колеса

Различают центровку по ступице и центровку по болтам. Колесо, отцентрованное по ступице, имеет цилиндрические отверстия под болты. Колесо центруется путем надевания колеса на ступицу. Точность центровки по ступице можно повысить с помощью центрующих втулок (3–4 втулки на колесо), вставляемых поверх болтов в отверстия для болтов в диске.

Рис. 6. Типы конструкций ободов:
a – обод с утопленным центром; b – конусная 15° посадочная полка обода; c – широкая конусная 15° посадочная полка обода; d – конусная 5° посадочная полка обода; 1 – хамп; 2 – основание обода; 3 – ширина обода; 4 – борт; 5 – конусная 15° посадочная полка обода; 6 – конусная 5° посадочная полка обода

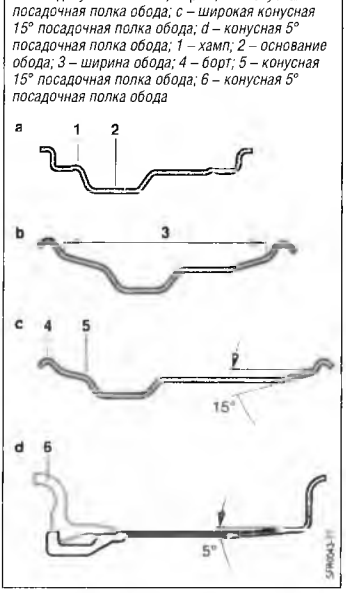
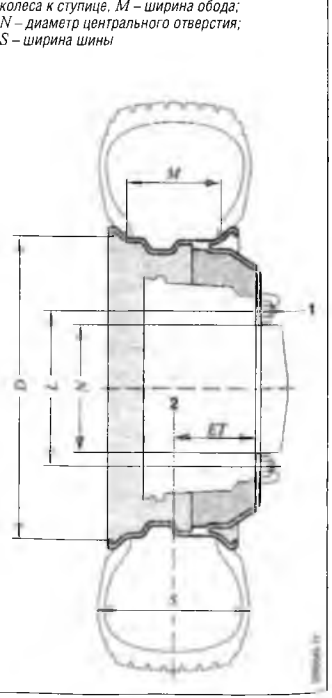


Рис. 7. Поперечное сечение колеса
(источник: MAN Nutzfahrzeuge Gruppe):
1 – отверстия под болты, 2 – центр обода;
D – диаметр обода, ET – вылет обода,
L – диаметр окружности под отверстия крепления колеса к ступице, M – ширина обода;
N – диаметр центрального отверстия;
S – ширина шины



Центровка по болтам производится путем сферического или конического фрезерования отверстий под болты в диске. Центровка по болтам оказывается очень точной при прецизионном сверлении отверстий под болты.

Радиальное и поперечное биение

Хорошая центровка колеса крайне важна для грузовиков, движущихся с большой скоростью, а также тогда, когда колеса большие и тяжелые. В частности, для грузовиков, движущихся с большой скоростью, сведение радиального и поперечного биения к минимуму и на посадочных площадках, и на бортах обода совершенно необходимо для обеспечения плавности хода. Это повышает безопасность и экономию топлива.

Колеса из легких сплавов

Колеса из легких сплавов используются, в частности, при перевозках, когда экономия массы имеет большое значение. Сюда относится перевозка цистерн, где очень важно не превышать максимальной снаряженной массы. В этих ситуациях более дорогие легкосплавные диски обычно окупаются в течение первого года эксплуатации.

Кованое легкосплавное колесо состоит из монолитного блока высокопрочного алюминиевого сплава. Блок выпрессовывается в форму колеса на мощных прессах. После ковки колесо подвергается тепловой обработке для улучшения своих механических свойств.

Эта высокоточная обработка обеспечивает абсолютно точное вращение каждого колеса, без биения. Радиальное и поперечное биение отсутствуют. Перед полировкой колеса до блеска в нем сверлятся вентиляционные отверстия и отверстия под болты.

Преимуществами легкосплавных колес являются улучшенные вибрационные характеристики, чуткое реагирование подвески, снижение расхода топлива и более высокая полезная нагрузка.

Шины

Классификация шин

Шины классифицируются с привязкой к соответствующим требованиям автомобилей различных типов и размеров, а также условиям эксплуатации. Самые важные данные – размеры шин, величины нагрузок, давление накачки и допустимая скорость – разбиты в интересах взаимозаменяемости на 7 групп или категорий шин, перечисленных в табл. 1. В дополнение к пневматическим шинам, допускаются также сплошные шины из резины; их эксплуатация разрешается на скорости до 25 км/ч (до 16 км/ч для неподрессоренных ведущих колес). Шины категорий 1–4 подразделяются в зависимости от дорожных условий на:

- «стандартные» дорожные (летние) шины;
- «специальные» шины для внедорожного применения или для использования как на дорогах, так и вне дорог;
- «M+S» (зимние) шины.

Одни и те же основные требования применимы ко всем шинам (см. табл. 2), хотя следует отметить, что для шин, предназначенных для большегрузных автомобилей, главное внимание следует уделять последним трем критериям (особенно № 6).

Конструкция шины

Конструкция шин

В настоящее время на легковые автомобили устанавливаются исключительно радиальные шины. Диагональные шины сегодня используются только на мотоциклах, мопедах, землеройных машинах и транспортных средствах, обслуживающих промышленность и сельское хозяйство. На грузовых автомобилях диагональные шины применяются все реже.

Диагональные шины получили свое название потому, что нити корда в протекторе шины расположены диагонально (под некоторым углом друг к другу) и пересекают друг друга.

Однако более сложные радиальные шины представляют собой единственное средство удовлетворения все расширяющегося спектра эксплуатационных характеристик, необходимых шинам. Теперь они используются на современных легковых автомобилях и тяжелых грузовиках. В радиальных шинах нити корда размещены по кратчайшему расстоянию между бортами. Брекерный пояс окружает относительно тонкий и упругий каркас для обеспечения достаточной устойчивости шины.

Шины с диагонально расположенными слоями брекерного пояса получили большое распространение в США, они содержат дополнительный пояс снаружи диагонального каркаса. Характеристики этого типа шин значительно хуже, чем у радиальных шин.

Таблица 1. Категории шин и применяемые стандарты

Номер	Применение шин	Немецкие стандарты (выбор)[1]	
		DIN	WdK[2]
1	**Двухколесные моторные транспортные средства** (мотоциклы, скутеры, легкие мотоциклы, мопеды)	7801, 7802, 7810	119
2	**Легковые автомобили,** включая грузопассажирские и со специальными запасными колесами	7803	128, 203
3	**Малотоннажные коммерческие автомобили,** включая развозочные	7804	132, 133
4	**Коммерческие автомобили,** включая многоцелевые	7805, 7793	134, 135, 142, 143, 144, 153
5	**Землеройные машины** (автомобили для транспортировки, погрузчики, грейдеры)	7798, 7799	145, 146
6	**Промышленные грузовые автомобили,** включая автомобили со сплошными резиновыми шинами	7811, 7845	171
7	**Сельскохозяйственные машины** (тракторы, сельхозтехника, прицепы)	7807, 7808, 7813	156, 161

[1]) Соответствующие Европейские стандарты можно найти в ETRTO (European Tire and Rim Technical Organization, Европейская организация по шинам и ободьям, Брюссель), публикация «Data Book of Tires, Rims and Valves».

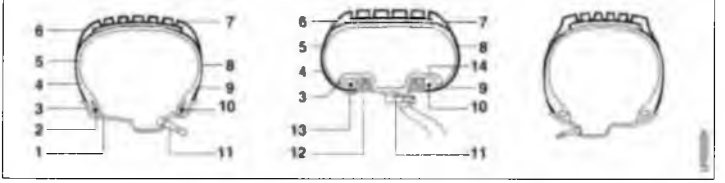
[2]) Руководство Экономической ассоциации немецкой резиновой промышленности, Франкфурт

Рис. 1. Примеры бескамерных шин радиальной конструкции:
1 – хамп; 2 – посадочная полка обода; 3 – борт обода; 4 – каркас шины; 5 – воздухонепроницаемый внутренний слой; 6 – брекерный пояс; 7 – протектор; 8 – боковина; 9 – борт шины; 10 – сердечник борта; 11 – вентиль, 12 – запорное кольцо; 13 – балансировочный грузик; 14 – буртик обода

Радиальные шины легковых автомобилей
Каркас шины: *два радиально ориентированных слоя вискозного шинного корда.*
Брекерный пояс: *два слоя пересекающихся* стальных нитей и два слоя нейлоновых нитей, расположенных по окружности

Шина типа СТ с плоской беговой дорожкой

Радиальные шины для грузовиков
Каркас шины:
один радиально ориентированный слой стального корда
Брекерный пояс:
четыре слоя из пересекающихся стальных нитей.



Шины типа СТ характеризуются плоской беговой дорожкой протектора. В спущенном состоянии такие шины, опираясь на седло обода, обеспечивают возможность движения автомобиля на расстояние в несколько сотен километров.

Бескамерные шины, уже популярные на легковых автомобилях, все более часто используются на тяжелых грузовиках. Основным требованием является применение монолитного, воздухонепроницаемого обода, или обода из нескольких частей, способного принять необходимые гибкие уплотнительные кольца. При использовании бескамерных шин камера заменяется вулканизированным внутренним слоем, характеризующимся высокой воздухонепроницаемостью. Борт такой шины должен садиться на обод колеса более герметично с целью обеспечения необходимого уплотнения. Иногда применяются специальные дополнительные уплотняющие элементы в форме колец из эластичного материала.

Отсутствие камеры в шине позволяет уменьшить массу шины и упростить операции по ее монтажу на обод колеса.

Диаметр и конструкция обода колеса

Для шин, входящих в категории 3 и 4, одноэлементный глубокий обод с конусностью 15° (для бескамерных шин) более предпочтителен, чем многоэлементный обод с конусностью 5°. Этот тип обода идентифицируется кодовыми обозначениями диаметра (единица кода соответствует 25,4 мм), оканчивающимися на 0,5; например, 17,5; 19,5 и 22,5.

Таблица 2. Рабочие характеристики

№	Основной критерий	Подкритерий
1	Комфорт при движении	Мягкая подвеска, низкий уровень шума, плавность качения при движении (малые отклонения от округлой формы шины)
2	Управляемость	Усилие рулевого управления, точность рулевого управления [3)]
3	Курсовая устойчивость	Устойчивость при движении по прямой [3)], устойчивость на поворотах [3)]
4	Безопасность движения	Посадка шины на ободе, сцепление шины с дорогой [3)]
5	Долговечность	Конструктивная прочность, возможность движения с высокими скоростями, герметичность, высокое сопротивление проколам
6	Экономичность	Ожидаемый срок службы (пробег), характер износа, износ боковины, сопротивление качению, возможность восстановления протектора

[3)] Основные критерии в условиях зимнего движения по дороге

Важными кодами для конической 5° посадочной полки обода являются 16 и 20. Для шин легковых автомобилей используются не только обычные ободья с утопленным центром (целочисленный коды диаметра 10, 12, 13 и т. д.), но и особые варианты с миллиметровыми обозначениями диаметра.

Отношение высоты профиля шины к ее ширине

Определяется по формуле $(H/W) \cdot 100$, где
H – высота поперечного сечения профиля шины;
W – ширина поперечного сечения профиля шины.

Это отношение для современных стандартных шин легковых автомобилей варьируется от 80 до 50; отношение, равное 35, соответствует шинам для спортивных автомобилей, от 65 до 100 – для шин грузовых автомобилей.

Шины легковых автомобилей с небольшим отношением H/W обеспечивают высокий уровень устойчивости на поворотах. При разных значениях этого отношения используется один посадочный диаметр шины для облегчения взаимозаменяемости шин. При постоянном внутреннем диаметре шины и колеса шина с небольшим отношением H/W будет шире на колесе того же диаметра, она будет иметь большее пятно контакта и более внушительный вид.

Небольшое отношение H/W позволяет поддерживать ширину пятна контакта, увеличивая внутренний диаметр колеса и тем самым оставляя больше пространства для колесного тормоза. Появление конусного обода с утопленным центром для шин грузовых автомобилей стало возможным лишь благодаря разработке подходящей бескамерной шины с небольшим отношением H/W. Причиной была невозможность уменьшения диаметра основания обода, так как нельзя было изменить диаметр тормозного барабана.

Более широкие шины с небольшим отношением H/W тоже представляют единственный целесообразный вариант для областей применения, где требуется минимальный диаметр шин (другими словами, максимальная полезная высота), например, в контейнерных перевозках.

Маркировка шин

Маркировка шины выштамповывается на ее боковине (см. табл. 5) и отражает стандартные требования, которые рассмотрены в Правилах ЕЭК ООН № 30 для шин легковых автомобилей, № 54 для шин большегрузных грузовых автомобилей (для скоростей движения 80 км/ч и выше) и № 75 для шин механических двухколесных транспортных средств (транспортные средства с двигателями, рабочий объем которых превышает 50 см³, перемещающиеся с установленной скоростью свыше 40 км/ч). Правила ЕЭК ООН № 106 для шин сельскохозяйственных машин в настоящее время не действуют. Соответствие требованиям к новым покрышкам (ECE-R 108 для шин легковых автомобилей; ECE-R 109 для шин грузовых автомобилей) является обязательным во Франции, начиная с 2008 года.

Шины, испытанные на соответствие Правилам ЕЭК ООН, идентифицируются посредством кода, нанесенного на боковине шины вблизи ее борта. Это кодовое обозначение состоит из расположенных в круге прописной буквы «Е» и кодовой цифры, за которыми следует число, соответствующее номеру регистрации данной конструкции шины.

Пример: (E4)020 427

Строчная буква «е», наносимая на боковину шин легковых и грузовых автомобилей в соответствии с Европейской директивой 92/23, имеет такое же значение в кодовой маркировке.

Пример: [e4]00321

Начиная с августа 2003 года, новые типы шин должны соответствовать директивам ЕС по уровню шумов. То же самое относится ко всем шинам легковых и грузовых автомобилей, начиная с 2009 года, согласно утвержденному графику. Эти постановления публикуются вместе с директивой 2001/43/EEC в качестве Приложения 5 Директивы ЕС по шинам 92/23/EEC. Знак соответствия на шинах выглядит следующим образом.

Пример: [e4]00687-s

Ширина шины, ее конструкция («R» – радиальная; «–» – с пересекающимися нитями; «B» – диагональная) и диаметр обода составляют минимальную информацию, требуемую для маркировки шины. На шинах промышленных грузовых автомобилей также обычно наносится значение диаметра шины. На шинах двухколесных транспортных средств, легковых и грузовых автомобилей эта информация часто дополняется значением отношения высоты шины H к ее ширине W (в %), это отношение нанесено непосредственно за информацией о ширине шины (с разделением пробелом). По нормам ЕЭК подобная информа-

ция должна присутствовать на всех новых шинах. Хотя это и не оговорено правилами ЕЭК, шины для легковых автомобилей и двухколесных транспортных средств могут также иметь кодовое обозначение максимальной скорости движения (нанесено после величины отношения высоты шины к ее ширине или значения ширины шины). На диагональных шинах буква кода заменена горизонтальной чертой.

На шинах типов VR, VB, ZR и ZB кодовая буква составляет часть обозначения размера шины.

За обозначением размера шины следует информация о норме слойности (PR); это обозначение сегодня используется как код номинальной нагрузки для различных вариантов шины одного и того же размера. Изначально этот код показывал количество слоев в каркасе шины.

В качестве эксплуатационных характеристик применяются дополнительные обозначения в виде комбинации индекса грузоподъемности (LI) и индекса скорости (GSY). Правила ЕЭК ООН предписывают это в качестве замены для нормы слойности PR или кодов скорости в обозначении шины. Конкретные значения, присваиваемые кодам, см, в табл. 4.

Для шин легковых автомобилей:
номинальная скорость движения равна максимальной скорости. Автомобили, предназначенные для движения при максимальной скорости 60 км/ч и менее обладают дополнительной грузоподъемностью. Номинальные нагрузки на шины могут увеличиваться, как это показано в табл. 3.

Таблица 3. Увеличение номинальной нагрузки

км/ч	Увеличение номинальной нагрузки в %	Увеличение давления воздуха в барах
60	10	0,1
50	15	0,2
40	25	0,3
30	35	0,4
25	42	0,5

Для большинства шин снижение грузоподъемности шины может обеспечить получение более высоких максимальных значений скоростей. И наоборот, можно использовать оба типа шин для более высоких нагрузок почти во всем диапазоне скоростей при эксплуатации на скорости ниже номинальной (опорной), при условии, что автомобиль может быть специально предназначен для эксплуатации на более низкой максимальной скорости. С другой стороны, шины, характеризующиеся повышенной грузоподъемностью, предназначены для прицепов к легковым автомобилям, движущихся со скоростями до 100 км/ч, а также для специальных грузовых автомобилей, используемых при перевозках на короткие расстояния.

Внутреннее давление в шинах определенных размеров, норма слойности PR и коды эксплуатационных характеристик нормируются стандартами (см. табл. 1) или рекомендациями изготовителя шины. Индекс скорости всегда означает фактическую номинальную скорость.

Специальные запасные шины легковых автомобилей (облегченные и компактной конструкции) идентифицируются на боковине шины как предназначенные для временной эксплуатации на ограниченной скорости.

Соответствие между номинальными скоростями для шин M+S легковых автомобилей, грузовых автомобилей и мотоциклов и максимальными значениями скоростей движения не регламентируется. Однако, табличка с указанием скорости, при которой может работать данная шина, должна закрепляться внутри автомобиля в пределах поля зрения водителя. Нижеприведенные категории шин могут быть снабжены дополнительными данными, которые регламентированы нормами по безопасности дорожного движения в США. Эти данные, наносимые на боковину шины вблизи ее борта, используются в Канаде, а также в Израиле:

Таблица 4. Коды эксплуатационных характеристик шин (примеры)

Индекс грузоподъемности (LI)										
LI	50	51	88	89	112	113	145	149	157	
кг	190	195	560	580	1120	1150	2900	3250	4125	

Индекс скорости (GSY)																	
GSY	F	G	J	K	L	M	N	P	Q	R	S	T	H	V	W	Y	
км/ч	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	210	240	270	300	

Таблица 5. Примеры обозначения шин

Группа шин	Вид транспортного средства	Пример обозначения: Размеры шин	PR [3]	Коды эксплуатационных характеристик: Li [4]	GSY [5]	Диаметр шины *A*	Ширина шины *B*	*H*/*W* %	Диаметр обода *d*
MC	Мопеды	2¼–16	–	–	–	–	Код	–	Код
	Мопеды с двигателем, рабочим объемом 50 см³	3–17 усиленные [2]	–	51	J	–	Код	–	Код
	Мотоциклы	3,00–17 усиленные [2]	–	50	P	–	Код	–	Код
		110/80 R 18	–	58	H	–	мм	80	Код
		120/90 B 18	–	65	H	–	мм	90	Код
	Скутеры	3,50–10	–	51	J	–	Код	–	Код
Легковые автомобили		165 R 14 M+S	–	84	Q	–	мм	–	Код
		195/65 R 15 усиленные [2]	–	95	T	–	мм	–	Код
		200/60 R 365	–	88	H	–	мм	60	мм
		205/60 ZR 15	–	91	W	–	мм	60	Код
		CT 235/40 ZR 475	–	–	–	–	мм	40	мм
CV	Легкие универсальные автофургоны	185 R 14 C [1]	8 PR	102/100	M	–	мм	–	Код
	Легкие грузовики	245/70 R 17,5	–	143/141	J	–	Код	–	Код
	Грузовики	11/70 R 22,5	–	146/143	K	–	Код	70	Код
	Прицепы	14/80 R 20	–	157	K	–	Код	80	Код
	Автобусы	295/80 R 22,5	–	149/145	M	–	мм	80	Код
MPV	Универсальные автомобили	10,5 R 20 MPT [8]	14 PR	134	G	–	Код	–	Код
	Универсальные автомобили	275/80 R 20 MPT [8]	–	134	G	–	мм	80	Код
EM	Транспортеры	18,00–25 EM [9]	32 PR	–	–	–	Код	–	Код
	Погрузчики	29,5–29 EM [9]	28 PR	–	–	–	Код	–	Код
FFZ	Промышленные грузовики	6,50–10 [6]	10 PR	–	–	–	Код	–	Код
	Легкие прицепы	21 x 4 [6]	4 PR	–	–	Код	Код	–	–
	Промышленные грузовики	28 x 9–15 [7]	14 PR	–	–	Код	Код	–	Код
		300 x 15 [7]	18 PR	–	–	–	мм	–	Код
AS	Тракторы	480/70 R 34	–	143	A 8	–	мм	–	Код
		7,50–60 AS [10] Передние	6 PR	–	–	–	Код	–	Код
	Оборудование [11]	11,0/65–12 Impl.	6 PR	–	–	–	Код	65	Код

Для шин легковых автомобилей: **175/70 R 13 82 S**; **175** мм – номинальная ширина шины, 70% – отношение *H*/*W*, **R** = радиальные шины, код **13** – диаметр обода (около 330 мм или 13 дюймов), индекс грузоподъемности – **82** (475 кг), символ индекса скорости **S** = 180 км/ч

[1]) C - шины для легких (развозных) грузовых автомобилей (также для мотороллеров большой грузоподъемности); [2]) усиленные = дополнительная нагрузка = дополнительное обозначение для усиленных шин 2-колесных транспортных средств и легковых автомобилей; [3]) PR – норма слойности, [4]) индекс грузоподъемности для одиночных и сдвоенных шин; [5]) индекс скорости, [6]) пневматические шины, [7]) сплошные резиновые шины, [8]) MPT – многоцелевые шины, [9]) EM – для землеройных машин; [10]) AS – шины для с х тракторов, [11]) шины для подвижного оборудования и прицепов.

- FMVSS (Федеральный стандарт автомобильной безопасности) 109 для шин легковых автомобилей;
- FMVSS 119 для шин двухколесных транспорных средств и коммерческих автомобилей.

Эти данные выштамповываются вблизи букв «DOT» и содержат идентификационный код шины и дату ее изготовления, а также информацию о максимальной грузоподъемности, максимальном внутреннем давлении и числе слоев корда в каркасе и брекерном поясе.

Австралийские нормы безопасности ADR 23 применяются к шинам легковых автомобилей; в этих нормах используются идентификационные коды, заимствованные из Федеральных стандартов автомобильной безопасности США (FMVSS) 109 и норм ЕЭК-R 30.

«IN» (вместе с номером соответствующего центра разработки) и CCCs – это обозначения шин в Бразилии и Китае. Технические требования в этих странах базируются на требованиях ЕЭК ООН.

Применение шин

Выбор шин на основании рекомендаций изготовителя имеет важнейшее значение для получения удовлетворительных результатов. Оптимальные рабочие характеристики могут быть получены, когда на всех колесах автомобиля устанавливаются шины одной конструкции (например, радиальные шины). Это является обязательным требованием для легковых автомобилей. Для грузовых автомобилей полной массой свыше 2,8 т это относится к шинам, установленным на одной оси. Во время сезонного хранения шин внутренние камеры и бандажи бортов имеют тенденцию к быстрому старению и охрупчиванию под воздействием прямого солнечного света. Катализатором этого процесса становится движущийся воздух. Для гарантирования хорошего состояния камеры особенно

Рис. 2. Примеры рисунков протектора:
1 – шина легкового автомобиля; 2 – шина типа M + S для легкового автомобиля; 3 – шина грузового автомобиля; 4 – шина грузового автомобиля с протектором, обеспечивающим высокое сцепление с дорогой



важна целостность упаковки. Следовательно, в месте хранения должно быть прохладно, сухо и темно. Необходимо избегать любого контакта с маслами и смазками. Особое внимание необходимо уделять монтажу шин на ободья колес. Ни в коем случае не следует устанавливать шины на поврежденный, деформированный обод со следами коррозии (допускается только минимальный износ обода). При использовании ослабшего борта этой стороне следует уделить особое внимание при эксплуатации. Новые вентили, а, по-возможности, новые камеры и бандажи бортов должны использоваться вместе с новыми шинами. Должны соблюдаться меры предосторожности при повторном размещении камер в шинах, которые при предыдущей эксплуатации подверглись расширению, что может привести к появлению опасных складок на камере после ее повторной установки в шине. При возникновении сомнений следует использовать новые камеры.

Рисунок протектора

Запрещается восстанавливать протектор на шинах двухколесных транспортных средств и легковых автомобилей; необходимо выполнять требования завода-изготовителя при восстановлении шин других категорий.

Рекомендуется производить перестановку шин, характеризующихся разной степенью износа протектора, по схеме, когда шина с одной

Таблица 6. Зависимость тормозного пути автомобиля от глубины рисунка протектора шины (при торможении со скорости 100 км/ч)

Автомобиль		Легковой автомобиль малого класса с передними ведущими колесами					Легковой автомобиль среднего класса с задними ведущими колесами (оборудован ABS)			
Глубина рисунка протектора	мм	8	4	3	2	1	8	3	1,6	1
Тормозной путь	м	76	99	110	129	166	59	63	80	97
	%	100	130	145	170	218	100	107	135	165
Увеличение тормозного пути на каждый 1 мм износа протектора шины, %		7	15	25	48		1,4	20	50	

оси автомобиля переставляется на другую его ось. Уменьшение глубины рисунка протектора шины сопровождается уменьшением защитного слоя, покрывающего брекерный пояс и каркас шины. Это следует учитывать при планировании долгосрочных поездок в сложных условиях. Кроме того, уменьшенная глубина рисунка протектора приводит к непропорциональному увеличению тормозного пути автомобиля на мокрой поверхности дороги из-за ухудшения коэффициента сцепления. Это необходимо учитывать применительно к легковым и скоростным грузовым автомобилям. Например, в табл. 6 приведены данные, позволяющие сравнивать тормозные пути при скорости в 100 км/ч для легковых автомобилей малого класса (переднеприводных) и среднего класса (заднеприводных) при разной степени износа протектора шин (тормозные пути в значительной мере также зависят от состояния и типа дорожного покрытия, профиля шины и качества резинового материала шины).

Таблица 7. Условные обозначения и единицы измерения

Обозначение	Величина	Единица измерения
f	Частота	Гц
$F_в$	Тормозная сила	кН
$F_н$	Нагрузка на колесо	кН
$F_б$	Боковая сила	кН
$M_в$	Стабилизирующий момент	Нм
$n_ш$	Продольный наклон шины	мм
p	Внутреннее давление в шине	бар
v_0	Скорость при испытаниях	км/ч
α	Угол увода	°
γ	Угол развала колес	°
λ	Относительное скольжение	–

Рис. 4. График взаимозависимостей рабочих характеристик шин

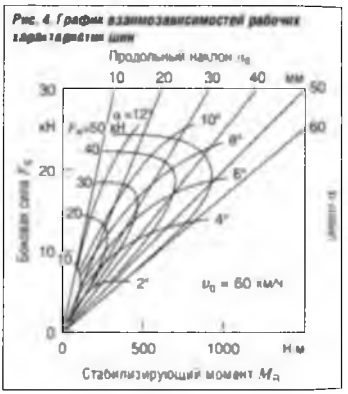


Рис. 3. Соотношение между боковым усилием, стабилизирующим моментом и углом увода

Параметр: скорость 20 км/ч ≤ v_0 ≤ 100 км/ч.

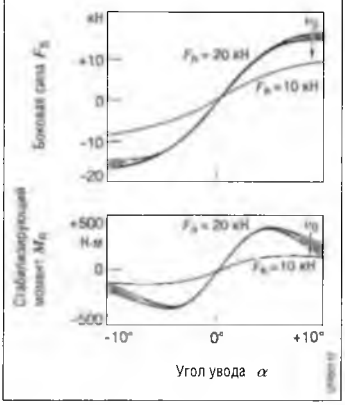
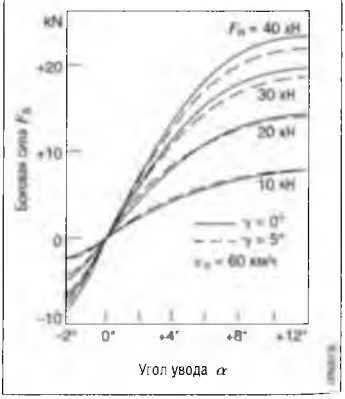


Рис. 5. Соотношение между боковым усилием и углом увода

Основные характеристики сидений: нагрузка на колесо и угол развала



Сцепление шины с дорогой

Определение точных характеристик шин является важным условием оптимизации управляемости, ходовых качеств, комфортабельности автомобиля и уменьшения вибраций в трансмиссии.

Достаточно полные данные о параметрах шин для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей представлены в различных публикациях [1,3,4]. По этой причине особое внимание в этом разделе будет уделяться шинам для большегрузных грузовых автомобилей размером 11 R 22,5, нашедшим широкое применение [2].

Приведенные ниже данные по рабочим характеристикам шин относятся к шине Michelin XZA 11 R 22,5.

Характеристики шины при свободном качении колеса и заданном угле увода

Когда шина вращается при заданном угле увода, боковые усилия являются функцией этого угла. Наличие боковых усилий вызывает появление стабилизирующего момента (рис. 4). Эта диаграмма часто используется для иллюстрации подобного явления [3]. Боковое усилие зависит от угла увода и медленно возрастает при приложении к колесу более высоких нагрузок (рис. 5). Боковые усилия обратно пропорциональны скорости движения, в то время как влияние скорости возрастает в зависимости от изменения нагрузки на колесо (рис. 3).

При рассмотрении работы шин для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей выявляется следующее. При качении колеса с заданным углом увода, определяемым развалом колеса, развал и боковые усилия приводят к параллельному смещению кривых «боковое усилие – угол увода».

Шины большегрузных грузовых автомобилей также подвержены воздействию боковых усилий, зависящих от развала, что приводит к дополнительному смещению этих же кривых; это явление имеет место только при больших углах увода. В результате практически все кривые пересекаются в точке начала координат (рис. 5). При движении по сухим дорогам уменьшенная глубина рисунка протектора шины приводит к большей крутизне кривых «боковое усилие – угол увода», что также сопровождается увеличением значений максимальных боковых усилий (рис. 6).

Рис. 6. Соотношение между боковым усилием и углом увода
Параметр: глубина протектора

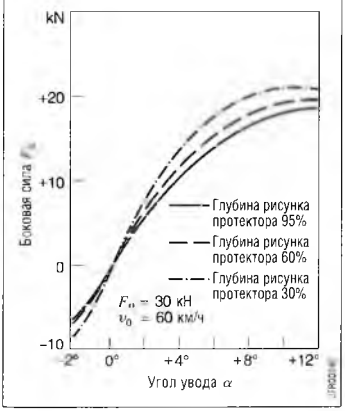


Рис. 7. Соотношение между силой торможения и углом увода
Основные характеристики: нагрузка на колесо и скорость движения

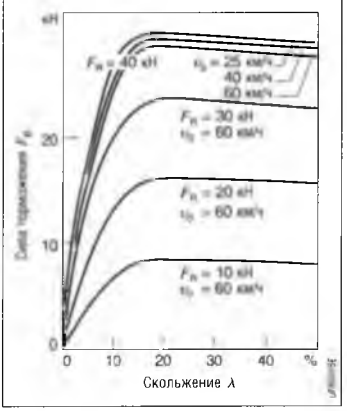


Рис. 8. Соотношение между боковым усилием и углом увода шин тяжеловесных грузовых автомобилей
Основные характеристики: внутреннее давление в шине и нагрузка на колесо

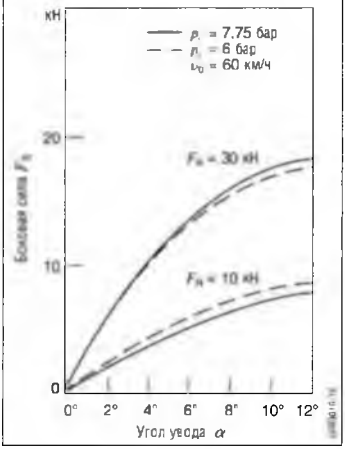


Рис. 9. Соотношение между тормозным усилием и углом увода шин тяжеловесных грузовых автомобилей
Основные характеристики: внутреннее давление в шине и нагрузка на колесо

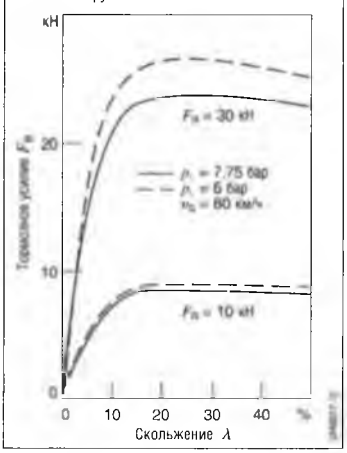
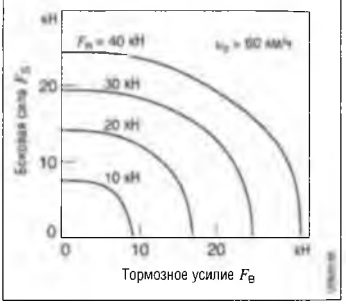


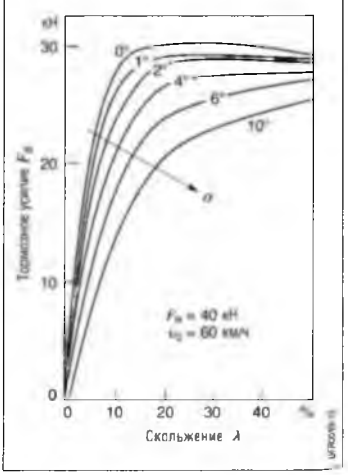
Рис. 10. Соотношение между боковой силой и тормозным усилием
Максимально достижимое сцепление шины с дорогой при постоянной нагрузке на колесо



Характеристики шины при ускорении и торможении во время качения колеса по прямой

Относительное скольжение воздействует на шину аналогично воздействию угла увода (рис. 7). Максимальное окружное усилие (сила торможения) обычно находится в диапазоне 10–20% относи-

Рис. 11. Соотношение между тормозным усилием и углом увода
Параметр: угол увода



тельного скольжения шины на сухом дорожном покрытии. Коэффициент сцепления в периферийном направлении уменьшается с ростом нагрузки на колесо не так сильно, как в поперечном направлении. На шинах больших размеров влияние, которое скорость движения оказывает на поперечный коэффициент сцепления, менее заметно в нормальном скоростном диапазоне для большегрузных грузовых автомобилей, чем для шин, устанавливаемых на легковых автомобилях (рис. 7).

Величина внутреннего давления в шине оказывает только минимальное влияние на максимальные окружные усилия при низкой нагрузке на колесо. При более высоких нагрузках на колеса пониженные давления в шинах в гораздо большей мере оказывают влияние на увеличение максимального окружного усилия (рис. 9).

Боковые и окружные усилия по разному изменяются при высокой нагрузке на шину при изменении внутреннего давления в шине (рис. 8 и 9).

Характеристики шины при разных углах увода и относительном скольжении

Если при качении шин к ним, кроме продольных сил, прикладываются и боковые силы, то любое проскальзывание, вызванное продольными силами, будет снижаться с увеличением угла увода. Чем больше значение угла увода, тем в большей степени кривая изменения максимальной продольной силы смещается в сторону более высоких показателей скольжения (рис. 11).

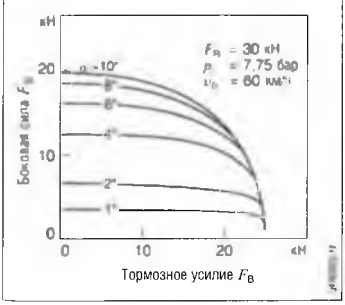
Эллиптические кривые, характеризующие зависимость между боковым и окружным (тормозным) усилиями, изменяются в соответствии с изменением величины нагрузки на колесо (рис. 10). При критической колесной нагрузке эта кривая соответствует пределу сцепления шины с дорогой для автомобилей, оборудованных антиблокировочной системой тормозов.

Измеренные характеристики шин показывают кривую боковой силы как функцию силы торможения в диапазоне углов бокового увода 0–10°. Такие параметры, как вертикальная нагрузка на колесо, скорость движения и давление в шине, остаются постоянными (рис. 12).

Рис. 12. Кривые, полученные на основе замеренных характеристик шин при нагрузке на колесо 30 кН

Соотношение между боковым усилием и силой торможения

Параметр: угол увода



Шины на мокрой дороге

Когда шины движутся по мокрой дороге (рис. 13), в передней части контактного пятна шины образуется зона вытеснения А. За короткой переходной зоной В следует зона фактического контакта С в задней части контактного пятна. Зона А характеризуется водяным клином, полностью отделяющим шину от поверхности дороги. Если зона А охватывает всю контактную поверхность

Рис. 13. Контактное пятно шины, зависящее от состояния дороги:

А – зона вытеснения; В – переходная зона; С – зона контакта; A_1 – контактная поверхность на сухой дороге; A_2 – контактная поверхность на мокрой дороге; x – направление движения; ω – угловая скорость колеса; 1 – водяной клин



Рис. 14. Влияние глубины слоя воды на силу торможения / боковую силу

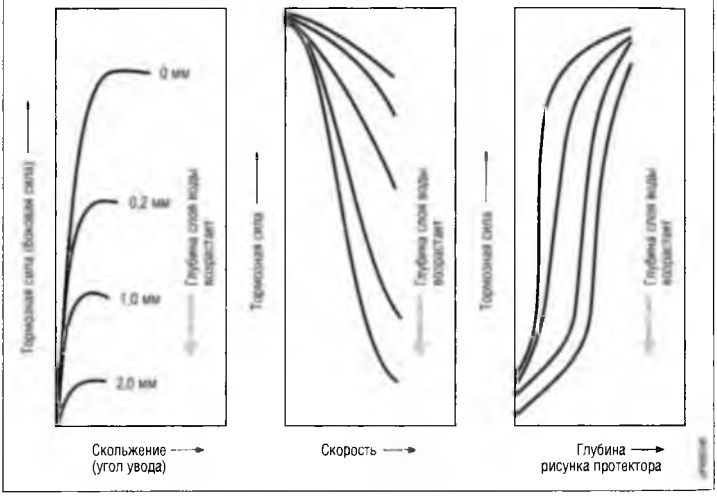
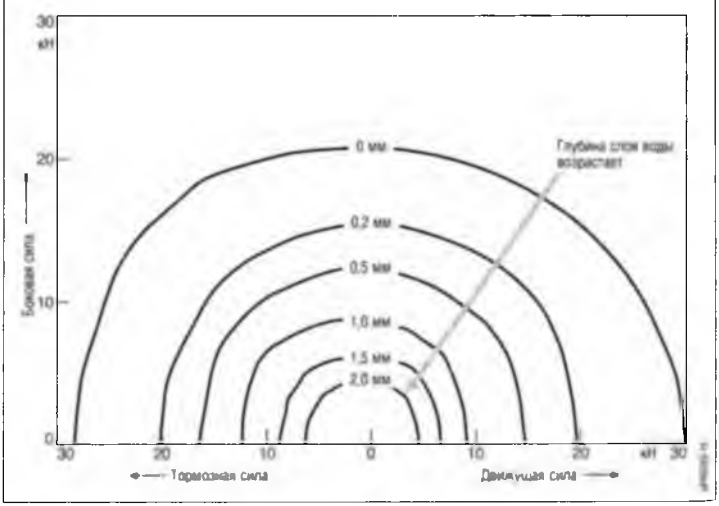


Рис. 15. Зависимость пределов сцепления от глубины воды



«шина/дорога», то автомобиль аквапланирует. Ниже перечислены ключевые переменные, влияющие на коэффициент сцепления шин на мокрой дороге:

- скорость движения;
- глубина слоя воды;
- нагрузка на колесо;
- ширина шины;
- глубина протектора;
- рисунок протектора;
- распределение контактного давления в контактном пятне шины;
- состав резины;
- состояние поверхности дорожного покрытия.

В свою очередь, каждый из этих параметров также зависит от ряда других влияющих переменных.

Например, распределение контактного давления в контактном пятне шины также зависит от конструкции шины, рисунка протектора, угла развала колес, брекерного пояса шины, конструкции боковин и, в увязке с двумя последними переменными, – от кривой рисунка протектора, параллельной оси колеса.

На левой схеме на рис. 14 показаны кривые сил, воздействующих на шины, в функции их конструктивных параметров. Примечательно, что наблюдаются в принципе одинаковые кривые для боковой силы как функции угла бокового увода и силы торможения как функции проскальзывания колеса на различной глубине воды. Форма характеристической кривой также одинаковая при разной глубине.

На средней схеме на рис. 14 показана зависимость силы торможения от скорости движения на различной глубине слоя воды. В диапазоне сцепления шин с мокрой дорогой, т.е. при минимальной глубине воды, на сцепление в значительной мере влияет состав резины. Однако в диапазоне аквапланирования, т.е. при высоком уровне воды и на высокой скорости (в остальном параметры шин идентичны) преобладающими влияющими переменными будут рисунок протектора и распределение контактного давления в контактном пятне шины.

Другим крупным влияющим параметром является глубина рисунка протектора, являющаяся частью сложной системы – рисунка протектора. На правой схеме на рис. 14 показан эффект глубины рисунка протектора при различной глубине воды.

Рис. 16. Характеристики аквапланирования грузовых шин различных изготовителей

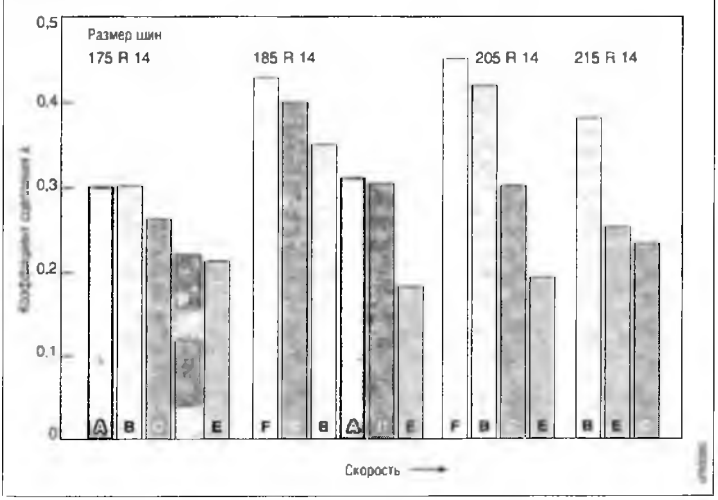
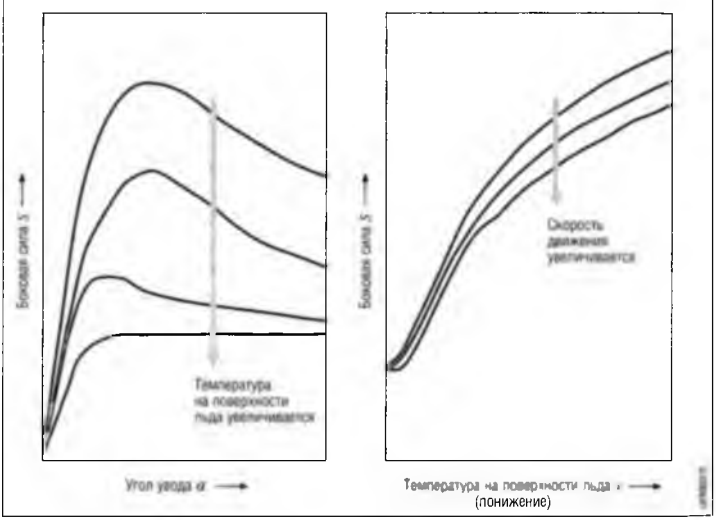


Рис. 17. Влияние температуры льда на поведение шин при прохождении поворотов



На рис. 15 приведена карта-схема, отображающая пределы сцепления с дорогой, зависящие от глубины слоя воды.

На рис. 16 показаны силы торможения, достигаемые с различными шинами в условиях аквапланирования. Разница в уровнях характеристик шин различных изготовителей в условиях аквапланирования очень значительна. Они могут противоречить концепции управления динамикой, используемой автопроизводителями на многих этапах оптимизации.

Шины на скользкой зимней дороге

Схемы характеристик шин на льду и снегу очень похожи на схемы характеристик на сухой дороге. Ключевыми параметрами, влияющими на сцепление с дорогой являются температура, условия образования слоя льда и снега, возраст ледяной или снежной структуры и степень загрязнения.

Другой важной переменной, влияющей на сцеление шин со скользкой зимней дорогой является состав резины шины.

Предъявляемые к шине требования при движении по снегу и по льду часто различаются. В то время как для снега идеально подходит большая компрессионная нагрузка и высота рисунка протектора, самоочищающегося и обеспечивающего хорошее сцепление, для оптимального сцепления на льду предпочтительна небольшая компрессионная нагрузка.

На схеме боковых сил и угла бокового увода показано влияние температуры на поверхности льда (рис. 17, слева).

В дополнение к широкому спектру максимально достигаемых боковых сил, ключевую роль в их формировании играет и температура. Здесь максимум боковых сил образуется на льду при температуре около 0 °C. Аналогично образуется максимум тормозных сил, как показано на схеме «силы торможения / скольжение колес».

На правой схеме на рис. 17 показано влияние температуры на поверхности льда на максимальную боковую силу при разной скорости. При падении температуры эффективность шины вновь повышается.

Требования к системе «колесо/шина»

Требования, предъявляемые к шинам будущего:

- общее соответствие системе «колесо/шина» в целом;
- в настоящее время предлагается меньше вариантов шин;
- разработки новых шин должны либо соответствовать, либо превосходить текущие требования к функциональной безопасности, экономичности и сроку службы;
- минимизированное сопротивление качению;
- стандартизированные шины на всех колесах;
- сниженная масса шины;
- общая совместимость с целями противоскольжения;
- пониженный уровень шума от качения шины;
- значительно меньше неоднородностей в шине;
- значительное улучшение сцепления шин с дорогой совершенно необходимо (как в поперечных, так и в продольных направлениях) для увеличения безопасности движения в потоке с другими участниками дорожного движения;
- раннее составление схем-характеристик шин для анализа и оптимизации управления динамикой.

Непрерывная адаптация грузовых автомобилей к существующим и предсказуемым запросам рынка – также требует расширения пределов характеристик шин. Это порождает следующие основные требования к конструкции шин:

- снижение массы шины;
- увеличение грузоподъемности;
- уменьшение неровности колес;
- увеличение долговечности колес в точках, подверженных растрескиванию (т.е. борт диска и вентиляционные отверстия, сварной шов между диском и ободом, радиус утопленного центра).

Карты динамических характеристик шины

Характеристические кривые для шин строятся на основе тех параметров, которые подвергаются постепенным изменениям при проведении измерений, т.е. в квази-статических условиях. Реальные условия работы, с другой стороны, характеризуются динамическими процессами. Увеличение скорости изменения влияющих параметров приведут к определенным изменениям реакции шины в плане маневрирования, которыми больше нельзя будет пренебрегать. Наиболее важными являются динамические изменения:

- угла увода;
- ширины колеи;
- развала;
- проскальзывания;
- нагрузки на колесо.

Реакция шины на эти быстро изменяющиеся параметры обычно описывается как функция частоты в программных картах, т.е. частотно-зависимые амплитуды и фазовые углы воздействующих на шину сил и моментов изображаются как функция сил, воздействующих на шину. Сюда относится частотно-зависимая характеристическая кривая для средних значений сил и моментов [5, 6].

Список литературы

[1] Gengenbach, W.: Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn (Experimental analysis of tires on wet road surface). ATZ, 1968, Volumes 3, 8, and 9,

[2] von Glasner, E.C.: Einbeziehung von Prüfstandsergebnissen in die Simulation des Fahrverhaltens von Nutzfahrzeugen (Including test-bench results in the simulation of commercial-vehicle handling). Postdoctoral thesis, University of Stuttgart, 1987.

[3] Gough, V. E.: Cornering Characteristics of Tyres. Automobile Engineer, 1954, Vol. 44.

[4] Weber R.: Beitrag zum Übertragungsverhalten zwischen Schlupf- und Reifenführungskräften (Contribution concerning the transitional behavior between slip and tire cornering forces). AI, 1981, Vol. 4.

[5] Fritz, G. Seitenkräfte und Rückstellmomente von Personenwagenreifen bei periodischer Änderung der Spurweite, des Sturz- und Schräglaufwinkels (Side forces and aligning torques of passenger-car tires under the influence of periodic changes in track width, camber, and slip angle). Doctoral thesis, University of Karlsruhe, 1978.

[6] Weber, R.: Reifenführungskräfte bei schnellen Änderungen von Schräglauf und Schlupf (Tire cornering forces as a function of rapid changes in slip angle and slip). Postdoctoral thesis, University of Karlsruhe, 1981.

Система контроля давления в шинах

Применение

Системы контроля давления в шинах (TPMS) используются в целях предотвращения их повреждения из-за недостаточного давления и, соответственно, сокращения количества аварий, происходящих из-за повреждения шин

Если автомобиль эксплуатируется с недостаточным давлением в шинах, это приводит к росту энергии сгиба на боковинах шины и, соответственно к повышенному износу шины При эксплуатации при полной нагрузке или на высокой скорости увеличение энергии сгиба боковин приводит к увеличению тепловой нагрузки, в результате шина может даже взорваться. После череды серьезных аварий с летальными исходами в США из-за взрыва недостаточно накачанных шин был принят закон (NHTSA Tread Act), регламентирующий повсеместную установку в США систем контроля давления в шинах для предупреждения водителей о низком давлении в шинах на ранней стадии. С сентября 2007 года все новые автомобили в обязательном порядке оснащаются системами контроля давления в шинах, выявляющими и повреждения шин, и медленное падение давления через резину в результате газовой диффузии.

Однако давление накачки шины – не только важная переменная для безопасности дорожного движения. Оно также значительно влияет на комфортабельность езды, срок службы шин и расход топлива. Уменьшение давления накачки на 0,6 бар может увеличить расход топлива на 4% в городском цикле и сократить срок службы шин на 50%. В Евросоюзе (ЕС) было принято решение предписать установку систем контроля давления в шинах на все новые автомобили, начиная с октября 2012 года, в целях уменьшения выбросов CO_2.

Уже сейчас возрастающая доля шин, на которых можно продолжить движение после прокола, обуславливает необходимость использования систем контроля давления в шинах, так как водитель в этом случае не способен обнаружить шину со значительной потерей давления на основании субъективных ощущений. Для предотвращения случайного превышения водителем пределов скорости и расстояния, предписанных при движении на таких шинах, их можно использовать только в сочетании с системой контроля давления в шинах.

Различают два типа систем контроля давления в шинах: системы прямого и косвенного измерения.

Системы прямого измерения

В системах прямого измерения в каждой шине устанавливается модуль с датчиком давления. Он передает такие данные, как давление в шине и температура шины, по кодированному высокочастотному каналу связи на блок управления. Блок управления анализирует эти данные, чтобы определить не только потери давления в отдельных шинах («определение проколов»), но и медленную потерю давления во всех шинах («газовая диффузия») Если давление в шине упадет ниже определенного порогового значения или если градиент давления превысит определенное значение, то водитель будет предупрежден световым или звуковым сигналом.

Модули с датчиками обычно встраиваются в ниппель шины. Как правило, они снабжаются батарейками питания. По сравнению с другими областями применения это влечет за собой дополнительные требования к потребляемой мощности, сопротивлению среды и чувствительности к ускорению. В качестве чувствительных элементов используются микромеханические датчики абсолютного давления.

Данные, измеряемые датчиками давления и температуры в шине, обрабатываются, модулируются в ВЧ-сигнал (433 МГц в Европе, 315 МГц в США) и излучаются антенной. Этот сигнал либо обнаруживается индивидуальными антеннами на колесных арках, либо центральным приемником (например, в блоке управления существующих систем дистанционного доступа без ключа).

Системам прямого измерения не требуется функция сброса, если они имеют фиксированный, постоянный порог предупреждения о потере давления Чтобы такая система работала, автомобиль должен лишь иметь одно предписанное давление накачки, вне зависимости от загрузки автомобиля и размера шин Если в шинах нужно установить различное давление накачки, то системе прямого измерения потребуется функция

сброса, чтобы можно было соответственно адаптировать порог предупреждения.

Преимуществами систем прямого измерения являются точное, реальное измерение давления в шине, а также то, что их функционирование не зависит от типов шин, состояния автомобиля и дороги. К недостаткам, по сравнению с системами косвенного измерения, можно отнести значительно большую стоимость системы, дополнительные логистические затраты в области поддержания готовности всех вариантов конструкции, затраты на каждый новый обод и ограниченный срок службы, зависящий от батареи питания.

Системы косвенного измерения

В системах косвенного измерения падение давления в шине определяется не напрямую, а через производную переменную. Для этого эти системы выполняют математически-статистический анализ разностей угловых скоростей всех колес, определяя таким образом проколотое, и при необходимости также оценивают смещение собственной частоты колеса для выявления газовой диффузии. В автомобилях с ABS или системами управления динамикой движения необходимая для этого скорость колеса определяется датчиками и передается на блок управления. Разности в скоростях возникают тогда, когда падение давления уменьшает окружность качения соответствующей шины, повышая ее угловую скорость относительно трех других колес. Вычитание, реализуемое с помощью недорогого расширения программных алгоритмов в ABS или системах управления динамикой движения позволяет определить падение давления в трех шинах. Для определения одновременного падения давления во всех четырех шинах анализируется диапазон собственных частот отдельных колес. Максимальная собственная частота колеса при падении давления на 20% изменяется с 40 Гц до приблизительно 38 Гц.

Системы косвенного измерения необходимо калибровать на номинальное давление. Калибровка инициируется нажатием кнопки сброса. При активации сброса система сохраняет текущие запоминаемые значения на следующих нескольких километрах в качестве новых опорных значений на основании текущих окружностей качения и собственной частоты колес. Возможность предупреждения появляется приблизительно через 10 минут езды.

Водителю необходимо активировать функцию сброса для повторной калибровки системы в случае замены одной или нескольких шин, перестановки шин с места на место (например, с передней оси на заднюю и наоборот), изменения давления в шине (например, при полной загрузке автомобиля) или выполнения работ на подвеске (например, регулировки подвески, замены амортизаторов).

Преимуществами систем косвенного измерения являются низкая стоимость и надежность в течение всего срока службы автомобилей, поскольку не требуется никаких дополнительных компонентов. Поскольку система связана с автомобилем, а не с колесами, то не возникает никаких дополнительных расходов в плане логистики и запчастей. Недостатком можно считать привязку к конкретной шине и, как следствие, более широкий разброс времени определения и более высокие затраты на адптацию функций системы к размерам шин, разрешенных для эксплуатации на данном автомобиле. Зависимость системы от пробега и состояния дороги также влияет на время определения.

Выполнение требований законодательства

На данный момент обе системы отвечают требованиям законодательства в Северной Америке и Европе в плане определения проколов и газовой диффузии. Предписания по системам контроля давления в шинах подготавливаются в Китае и Корее.

Рулевое управление

Определения для систем рулевого управления

Системы рулевого управления можно классифицировать следующим образом:

Мускульная система рулевого управления
Необходимые усилия рулевого управления генерируются исключительно мускульной энергией водителя. Эти системы рулевого управления в настоящее время используются в самых маленьких легковых автомобилях.

Система рулевого управления с усилителем
Усилия рулевого управления генерируются мускульной энергией водителя и вспомогательной силой, реализуемой гидравлически и в последнее время все чаще электрически. Эта система рулевого управления в настоящее время используется в легковых и грузовых автомобилях.

Система автоматизированного рулевого управления
Усилия рулевого управления генерируются исключительно немускульной (внешней) энергией (например, в машинах).

Фрикционная система рулевого управления
Усилия рулевого управления создаются силами, воздействующими на контактное пятно шины. Примером такой системы могут служить поддерживающие мосты в грузовиках. Передача рулевых и вспомогательных сил происходит механически, гидравлически или электрически либо сочетаниями этих трех компонентов.

Требования к системе рулевого управления

Общие требования
Система рулевого управления преобразует создаваемые водителем вращательные движения рулевого колеса в изменение угла поворота управляемых колес автомобиля. Конструкция и схема системы призваны обеспечить удобное и безопасное рулевое управление автомобиля во всех ситуациях и на всех скоростях. Вся система рулевого управления, от рулевого колеса и до управляемых колес, должна в этих целях обладать следующими свойствами.

Передача инициируемых водителем рулящих движений на рулевом колесе без люфта особенно важна при движении по прямой. Это гарантирует безопасное, неутомительное для водителя управление автомобилем, прежде всего на средних и высоких скоростях.

Поэтому рулевой механизм должен быть очень жестким. Это необходимо для обеспечения точной управляемости и преодоления отклонения от заданного угла поворота рулевого колеса под действием изменяющихся возвратных сил, возникающих, например, при изменении бокового ускорения.

Слабое трение в рулевом механизме позволяет водителю получать через реактивные силы тактильную обратную связь, дающую информацию о коэффициенте сцепления между дорогой и шинами. Слабое трение также помогает колесам выравняться для движения по прямой. В системах рулевого управления с мускульной энергией слабое трение обеспечивает небольшие движущие

Таблица 1. Нормы рабочих усилий в системе рулевого управления

Класс автомобиля	Исправная система			Неисправная система		
	Максимальное рабочее усилие в даН [1]	Время, с	Радиус поворота, м	Максимальное рабочее усилие, даН [1]	Время, с	Радиус поворота, м
M1	15	4	12	30	4	20
M2	15	4	12	30	4	20
M3	20	4	12 [2]	45	6	20
N1	20	4	12	30	4	20
N2	25	4	12	40	4	20
N3	20	4	12 [2]	45 [3]	6	20

[1] 1 даН = 10 Н, [2] при наличии ограничителя поворота это значение может быть меньше, [3] 50 даН для автомобиля без или с двумя и более управляемыми осями, исключая фрикционно-управляемые оси

силы; в системах рулевого управления с усилителем оно повышает эффективность управления.

Кинематические параметры рулевого управления и конструкция управляемой оси автомобиля должны быть такими, чтобы водитель мог чувствовать величину сцепления между шинами и дорогой.

Требования к рулевому управлению

Требованиями к функционированию системы рулевого управления являются:

Легкое, безопасное рулевое управление автомобилем. Сюда, к примеру, относится тенденция рулевого управления автоматически возвращаться в положение прямолинейного движения при отпускании руля.

Максимально возможное демпфирование колебаний, передаваемых от колес автомобиля на рулевое колесо при движении по неровным дорогам. Но этот процесс не должен приводить к потере обратной связи в рулевом управлении.

Для обеспечения чистого качения колес и, соответственно, предотвращения их избыточного износа вся рулевая кинематика должна удовлетворять условию Аккермана. Это означает, что оси управляемых колес должны пересекаться в одной точке с осью задних колес (рис. 1).

Достаточно жесткая схема всех компонентов рулевого механизма означает, что даже малые инициируемые водителем рулевые движения преобразуются в изменение направления управляемых колес, обеспечивая безопасную и точную управляемость автомобиля.

Угол поворота рулевого колеса от упора до упора по соображениям комфорта должен быть как можно меньше при парковке и движении с небольшой скоростью. Однако на средних и высоких скоростях рулевое управление не должно быть столь чувствительным.

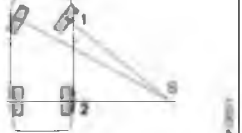
Требования законодательства

Требования законодательства, предъявляемые к системам рулевого управления автомобилей, описаны в международных правилах ECE-R79 [1]. К этим требованиям, наряду с базовыми функциональными требованиями, относятся максимально допустимые управляющие силы для исправной и неисправной систем рулевого управления. Эти требования регламентируют прежде всего поведение автомобиля и рулевого управления при въезде на круг и выезде с круга. Для автомобилей всех категорий: после отпускания рулевого колеса при движении автомобиля по окружности на скорости 10 км/ч, радиус поворота автомобиля должен увеличиться или как минимум остаться тем же.

Для автомобилей категории M1 (легковые автомобили с числом посадочных мест до 8): когда автомобиль в тангенциальном направлении выезжает из круга с радиусом 50 м на скорости 50 км/ч, в системе рулевого управления не должно возникать никаких необычных вибраций. В автомобилях категорий M2, M3, N1, N2 и N3 это поведение должно демонстрироваться на скорости 40 км/ч или, если это значение не достигается, то на максимальной скорости.

Это поведение также предписывается в случае неисправности у автомобилей с гидро- или электроусилителем рулевого управления. У автомобилей категории M1 это должно быть возможно в случае отказа сервопривода рулевого управления для въезда со скоростью 10 км/ч в течение 4 секунд в круг радиусом 20 м. Управляющее усилие на рулевом колесе не должно превышать 30 даН (Табл. 1).

Рис. 1. Условие Аккермана:
1 – оси передних колес; 2 – задняя ось; S – точка пересечения осей передних колес с задней осью



Типы рулевых механизмов

Требования к системе рулевого управления дали развитие прежде всего двум фундаментальным типам рулевых механизмов. Оба типа можно использовать в системах с чисто мускульной энергией или (в сочетании с соответствующими сервосистемами) в системах с усилителем рулевого управления.

Реечный рулевой механизм

В принципе, как следует из названия, реечный рулевой механизм состоит из шестерни и зубчатой рейки (рис. 2). Передаточное отношение механизма определяется отношением числа оборотов шестерни, равного числу оборотов рулевого колеса, к перемещению рейки.

В качестве альтернативы постоянному передаточному числу рейки на рейке за счет соответствующей нарезке зубьев имеется возможность изменять это число в зависимости от длины хода. Таким образом, устойчивость при движении автомобиля по прямой можно улучшить посредством непрямого передаточного числа вокруг центра рулевого управления. В то же время это возможно с реализацией прямого передаточного числа в диапазоне средних и больших углов поворота (например, при парковке) для уменьшения необходимого угла поворота при повороте рулевого колеса от упора до упора.

Рулевой механизм типа «винт-шариковая гайка-сектор»

Усилия, возникающие между винтом и гайкой рулевой передачи, передаются через ряд рециркулирующих шариков, снижающих трение (рис. 3). Гайка воздействует на вал сошки через зубчатый сектор. Этот рулевой механизм также позволяет получать переменное передаточное отношение.

Повышение эффективности рулевого управления с зубчатой рейкой означает, что рулевой механизм с шариковой гайкой практически больше не используется в легковых автомобилях.

Рис. 3. Рулевой механизм с шариковой гайкой:
1 – червяк; 2 – рециркулирующие шарики; 3 – гайка рулевой передачи; 4 – вал сошки с зубчатым сектором

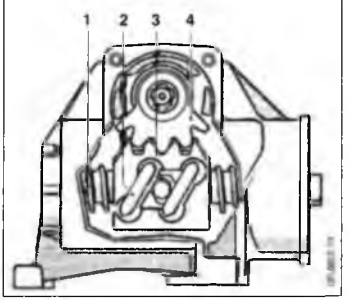
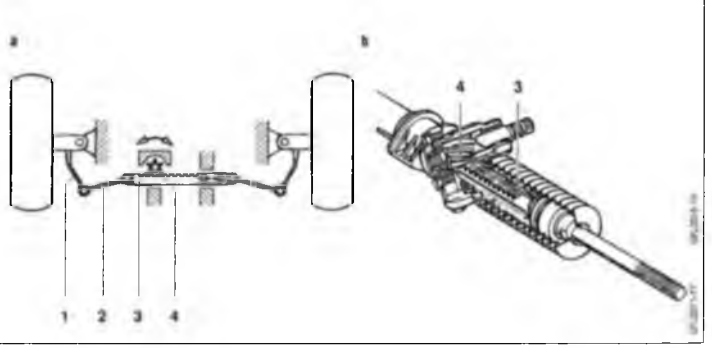


Рис. 2. Реечный рулевой механизм:
a – схема; b – детализация; 1 – рычаг поворотного кулака; 2 – боковая рулевая тяга; 3 – зубчатая рейка; 4 – шестерня



Рулевое управление с усилителем для легковых автомобилей

Увеличение размеров и массы автомобилей и повышение требований к комфорту и безопасности в последние годы привело к тому, что рулевое управление с усилителем появилось на всех категориях легковых автомобилей, вплоть до компактных. Эти системы, за редким исключением, устанавливаются в базовой комплектации. Усилия водителя по рулению поддерживаются гидравлической или электрической сервосистемой. Эта сервосистема должна быть такой, чтобы водитель постоянно получал четкую обратную связь о сцеплении шин с дорогой, и чтобы эффективно гасились негативные воздействия, вызываемые неровностями дороги.

Системы рулевого управления с гидравлическим усилителем

Сочетание механической конструкции рулевого механизма с гидравлической сервосистемой привело к созданию реечного рулевого механизма с усилителем (рис. 4) и рулевой механизм с шариковой гайкой с усилителем.

Распределительный клапан

Служит для нагнетания в силовой цилиндр гидравлической жидкости под таким давлением, которое соответствует углу поворота рулевого колеса (рис. 5). Упругий датчик крутящего момента, обычно торсион (рис. 4) обеспечивает

Рис. 5. Принцип действия управляющего клапана рулевого управления с гидроусилителем:
a – управляющий клапан в нейтральном положении; b – управляющий клапан в рабочем положении; 1 – насос гидроусилителя; 2 – управляющая втулка; 3 – вращающийся золотник; 4 – левая камера рабочего цилиндра; 5 – правая камера рабочего цилиндра; 6 – бачок

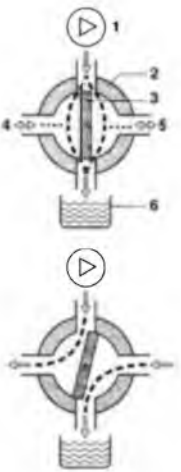
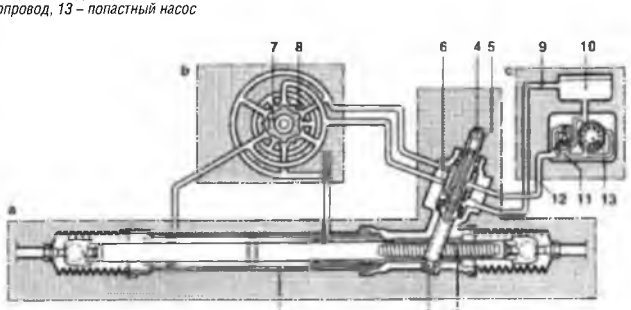


Рис. 4. Схема системы рулевого управления с усилителем; пример: рулевое управление с реечным рулевым механизмом и распределителем с вращающимся золотником:
a – рулевое управление в сборе, b – поперечное сечение распределителя с вращающимся золотником (увеличено); c – подача жидкости; 1 – рабочий цилиндр; 2 – ведущая шестерня; 3 – зубчатая рейка; 4 – торсион; 5 – рулевой вал; 6 – управляющий паз; 7 – вращающийся золотник; 8 – управляющая втулка; 9 – возвратный трубопровод, 10 – бачок; 11 – нагнетательный и перепускной клапан; 12 – нагнетательный трубопровод, 13 – попастный насос



преобразование момента на рулевом колесе при отсутствии люфта в пропорциональное этому моменту прецизионное управляющее перемещение золотника. Перемещение золотника вызывается поворотным скольжением относительно управляющей втулки. Каналы золотника, которые выполнены в форме паза, в результате управляющего перемещения образуют отверстия соответствующего поперечного сечения для пропуска жидкости.

Распределительные клапаны обычно работают в соответствии с так называемым принципом «открытого центра», т.е. когда распределительный клапан не действует, жидкость, подаваемая насосом, перепускается обратно в бачок при нулевом давлении.

Характеристики рулевого управления с усилителем

Растущие требования к удобству и безопасности привели к появлению управляемых систем рулевого управления с усилителем. Одним из примеров является электронно управляемая реечная система рулевого управления с усилителем (рис. 6). В зависимости от скорости движения автомобиля, замеряемой посредством электронного спидометра, изменяется сила, воздействующая на рулевое управление (рис. 7). ЭБУ анализирует скорость и определяет уровень гидравлической обратной связи и, соответственно, необходимое рабочее усилие на рулевом колесе. Этот уровень гидравлической реакции передается на распределительный клапан системы рулевого управления через электрогидравлический конвертер, который модифицирует гидравлическую реакцию относительно скорости автомобиля.

Определенные характеристики усилителя рулевого управления позволяют поворачивать рулевое колесо с минимальным усилием при стоящем автомобиле или во время его движения с небольшой скоростью. Степень усиления снижается с повышением скорости движения. Таким образом, при движении с высокими скоростями обеспечивается возможность управления поворотами автомобиля в оптимальном

Рис. 7. Характеристические кривые системы рулевого управления с усилителем
(форма кривых может изменяться в соответствии с изменениями параметров автомобиля)



Рис. 6. Схема управляемой системы рулевого управления с гидроусилителем:
1 – электронный спидометр; 2 – ЭБУ; 3 – распределительный клапан рулевого управления; 4 – реечный рулевой механизм; 5 – насос гидроусилителя; 6 – бачок; 7 – шланги; 8 – рулевая колонка



режиме. При такой системе важно, что давление и расход гидравлической жидкости никогда не снижаются и поэтому эти параметры могут быть немедленно востребованы в критических ситуациях управления.

Рабочий цилиндр

Силовой цилиндр двойного действия преобразует давление гидравлической жидкости во вспомогательное усилие, воздействующее на рейку и усиливающее воздействие водителя на рулевое колесо. Этот цилиндр обычно размещается внутри картера рулевого механизма и характеризуется низким трением. Поскольку цилиндр должен иметь крайне низкое трение, то особо высокие требования предъявляются к поршню и уплотнениям штока.

Подача жидкости

Подача жидкости осуществляется насосом (обычно приводимым от двигателя автомобиля), который соединен с бачком посредством шлангов и трубок. Насос должен быть рассчитан на нагнетание необходимого давления и объема гидравлической жидкости для выполнения парковки даже на холостых оборотах двигателя.

Для защиты от перегрузок в системе рулевого управления требуется клапан ограничения давления. Этот клапан обычно встраивается в насос. Конструкция насоса должна обеспечивать такой режим работы, чтобы рабочая температура гидравлической жидкости не поднималась выше предельного уровня, отсутствовал шум при работе насоса и не образовывалась пена в используемой жидкости.

Насос для усиления рулевого управления может также иметь привод от электродвигателя. Здесь обычно используется шестеренчатый или роторный насос. Из-за ограниченной мощности электрической системы автомобиля эти системы используются в основном в автомобилях классов A и B. Поскольку необходимость в ременном приводе от ДВС отпадает, то насос можно устанавливать произвольно, что благоприятствует модульной конструкции автомобиля. Управляющая электроника и анализ сигналов, например, скорости автомобиля и скорости руления, позволяют адаптировать частоту вращения вала насоса к текущему энергопотреблению рулевого управления и ситуации на дороге в целях экономии энергии.

Системы рулевого управления с электроусилителем

Системы рулевого управления с электромеханическим усилителем также используются в легковых автомобилях среднего и малого классов. Такие системы имеют электродвигатель, работающий от бортовой сети. Механическое соединение электродвигателя и рулевого механизма может быть реализовано в виде рулевой колонки и привода. Система состоит из следующих компонентов (рис. 8):

- рулевая колонка, соединяющая шестеренку рулевого механизма с рулевым колесом автомобиля;
- шестерня, преобразующая вращательное рулевое движение в линейное перемещение зубчатой рейки;
- зубчатая рейка, соединенная с колесами через тяги и рычаги;
- датчики, регистрирующие информацию для вычисления необходимого дополнительного крутящего момента на шестерне;
- серво-блок, состоящий из ЭБУ и серводвигателя (электродвигателя), генерирующего дополнительный крутящий момент на шестерне.

Когда водитель поворачивает рулевое колесо, датчик регистрирует прилагаемый крутящий момент и отправляет эту информацию в виде электрического сигнала (аналогового или цифрового) на ЭБУ. ЭБУ вычисляет дополнительный крутящий момент и на основании вычисленного значения активирует серводвигатель. В настоящее время в качестве серводвигателей используются коллекторные или бесщеточные электродвигатели постоянного тока или трехфазные асинхронные двигатели. В зависимости от необходимых характеристик рулевого управления создаваемый этими электродвигателями крутящий момент составляет 3–6 Н·м.

Направление вращения двигателя зависит от направления вращения рулевого колеса. Возвратное движение рулевого колеса также может быть усилено. Это происходит, когда водитель выходит из поворота. В этой ситуации серводвигатель создает крутящий момент, поддерживающий обратное вращение рулевого колеса в положение движения по прямой.

Серводвигатель передает этот поддерживающий крутящий момент через червячную передачу или механизм типа «винт-шариковая гайка-сектор». В зависимости от варианта рулевого управления он передается на рулевую колонку, шестерню и зубчатую рейку реечного механизма.

Управляющая электроника учитывает различные сигналы и параметры, например,

скорость движения, угол поворота рулевого колеса, крутящий момент на рулевой колонке и скорость руления. С помощью других расположенных в автомобиле датчиков и благодаря объединению в сеть ЭБУ рулевого управления с другими ЭБУ, эту систему рулевого управления можно использовать для реализации вспомогательных функций, повышающих комфорт и безопасность движения.

Ориентированное на потребности управление электродвигателем позволяет достичь значительной экономии топлива, в среднем на 0,3 л / 100 км по сравнению с гидроусилителем, насос которого приводится в действие от ДВС. В городском цикле экономия топлива возрастает до 0,7 л / 100 км.

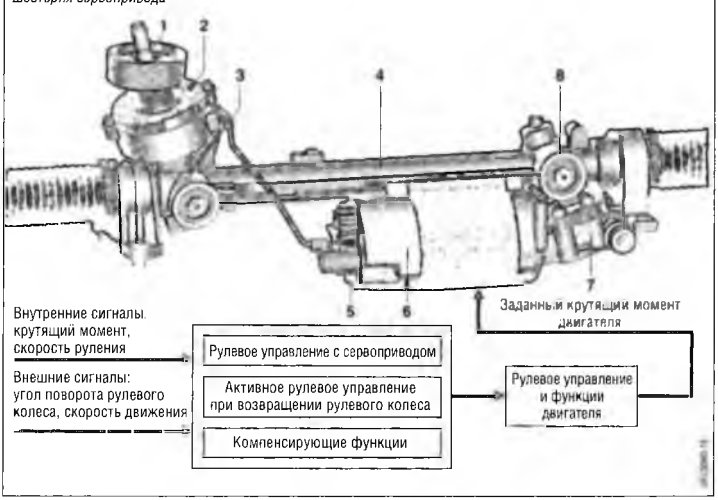
В случае сбоя энергоснабжения или усиления рулевого управления водитель может продолжить руление чисто механически, но с большими мускульными затратами.

Рулевое управление с наложением угла поворота рулевого колеса

В системе рулевого управления с наложением угол поворота рулевого колеса может увеличиваться или уменьшаться на определенную величину. Эта система обычно комбинирует с управляемой системой рулевого управления с электро- или гидроусилителем. Рулевое управление с наложением угла поворота рулевого колеса не обеспечивает автономной езды, но оптимально адаптирует характеристики рулевого управления к ситуации движения, обеспечивая максимальный комфорт и курсовую устойчивость. При объединении в сеть системы управления с динамическими параметрами такое рулевое управление может еще больше повысить безопасность в критических ситуациях дорожного движения посредством не зависящих от водителя регулировок рулевого управления. Такие системы рулевого управления уже производятся серийно под торговыми марками Active Steering (BMW) и Dynamic Steering (Audi).

Угловое наложение, не зависящее от задаваемого водителем угла поворота рулевого колеса в настоящее время реализуется двумя техническими решениями.

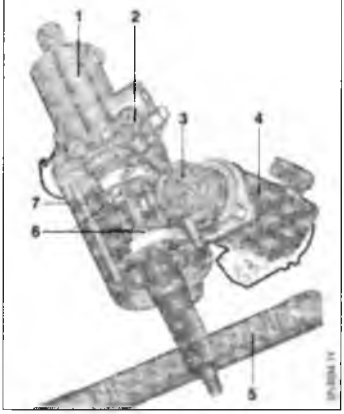
Рис. 8. Система рулевого управления с электроусилителем:
a – схема; b – протекание сигнала; 1 – рулевой вал; 2 – датчик крутящего момента, 3 – шестерня рулевого вала, 4 – реечный рулевой механизм; 5 – ЭБУ; 6 – сервопривод (электродвигатель); 7 – редуктор, 8 – шестерня сервопривода



Планетарный механизм

Двойной планетарный механизм с различными передаточными числами встроен в общее водило планетарной передачи в рулевом механизме (рис. 9). Это означает постоянное наличие механической связи между рулевым колесом и управляемыми колесами. Разные передаточные числа означают, что при повороте водила планетарной передачи задается дополнительный угол поворота. Угол задается электродвигателем, вращающим червячное колесо водила планетарной передачи.

Рис. 9 Планетарный механизм, рулевое управление с наложением:
1 – клапан; 2 – электромагнитная блокировка; 3 – червяк; 4 – электродвигатель; 5 – рейка; 6 – планетарная передача; 7 – червячная передача



Волновая зубчатая передача с гибким звеном

Блок наложения угла поворота (рис. 10) в этом случае состоит из волновой зубчатой передачи с гибким звеном и электродвигателя с полым валом (рис. 11). Очень компактная конструкция позволяет встроить этот блок в рулевую колонку без ущерба таким параметрам, как монтажное пространство и поведение при столкновении. Вал на конце с рулевым колесом положительно соединен с гибким шлицем. Поворотное движение рулевого колеса через зубчатое зацепление передается на внутреннюю шестерню (круговой шлиц) для выходного вала. Эллиптический внутренний ротор (валогенератор), размещенный в гибком шлице, приводимый электродвигателем, генерирует наложенный угол поворота через разное количество зубьев между гибким и круговым шлицами. Здесь также имеется постоянная механическая связь между рулевым колесом и управляемыми колесами через зубчатое зацепление волновой передачи.

В пассивном состоянии электродвигатель блокируется электромеханической блокировкой, обеспечивая прямой механический сквозной привод для рулящего движения.

Рис. 10 Схема рулевого управления с наложением угла поворота с волновой передачей:
1 – электродвигатель с волновой передачей; 2 – рулевая колонка; 3 – промежуточный рулевой вал, 4 – насос гидроусилителя; 5 – реечный рулевой механизм с усилителем

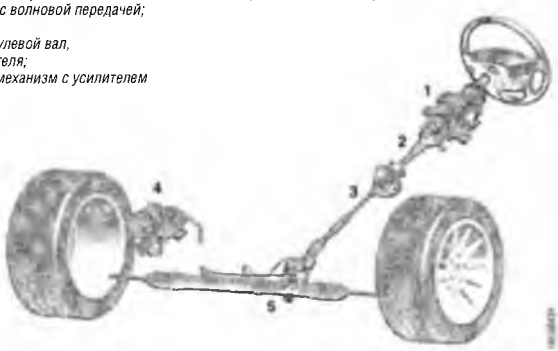
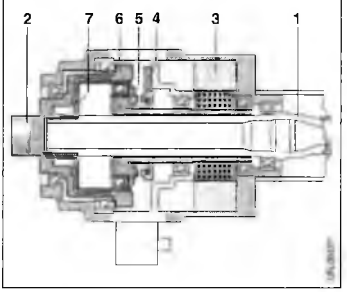


Рис. 11. Актуатор рулевого управления с наложением угла поворота с волновой передачей:
1 – ведущий вал;
2 – выходной вал;
3 – электродвигатель;
4 – датчик положения ротора;
5 – эллиптический внутренний ротор (валогенератор);
6 – внутренняя шестерня (круглый шлиц);
7 – гибкий шлиц



Концепция активации

ЭБУ рулевого управления с наложением угла поворота проверяет правдоподобность необходимой информации датчика и анализирует. Он вычисляет заданный угол для электродвигателя и через встроенный задающий каскад генерирует сигналы широтноимпульсной модуляции для активации электродвигателя, который представляет собой бесщеточный электродвигатель постоянного тока со встроенным датчиком положения ротора. Максимальный ток электродвигателя составляет 40 А при напряжении бортовой сети 12 В. Датчик положения ротора позволяет блоку управления регулировать электронную коммутацию и, соответственно, направление вращения ротора. Он также вычисляет и проверяет суммарный заданный дополнительный угол поворота с помощью алгоритма суммирования в программном обеспечении блока управления.

Эффективный угол поворота, сумма угла поворота рулевого колеса и наложенного угла поворота электродвигателя вычисляются блоком управления и передаются по автомобильной шине связи на соответствующие ЭБУ.

Заданное значение

Заданное значение эффективного угла поворота, формируемое в ЭБУ рулевого управления с наложением угла поворота состоит из частичного заданного значения для комфортабельности рулевого управления и частичного заданного значения для стабилизации автомобиля. Сигналы, необходимые для вычисления этих переменных, считываются блоком управления по шине CAN.

Частичное заданное значение для комфортабельности рулевого управления представляет собой зависимое от скорости движения переменное передаточное отношение рулевого управления. Это значение вычисляется из скорости движения автомобиля и угла поворота рулевого колеса. Когда автомобиль неподвижен или движется с небольшой скоростью, к задаваемому водителем углу поворота добавляется определенный угол. Это делает передаточное отношение более чувствительным. Водитель может полностью повернуть колеса менее чем за один полный оборот рулевого колеса. Этот добавочный угол поворота непрерывно уменьшается с ростом скорости движения. Начиная со скорости порядка 80–90 км/ч из задаваемого водителем угла поворота вычитается определенный угол, и рулевое управление становится менее чувствительным. Это обеспечивает устойчивость автомобиля при движении по прямой на высокой скорости и в то же время предотвращает потерю управления над автомобилем из-за слишком резкого руления.

Для вычисления частичного заданного значения для стабилизации автомобиля – в дополнение к углу поворота и скорости движения – перемещение автомобиля измеряется с помощью датчиков угловой скорости поворота вокруг вертикальной оси и бокового ускорения. В системе рулевого управления с наложением используются датчики системы курсовой устойчивости. Как же, как и ESP, запускаемая в ЭБУ вычислительная модель расчитывает эталонное движение автомобиля. В случае отклонения фактического движения автомобиля от эталонного активируется рулевое управление для стабилизации автомобиля. Обе системы непрерывно обмениваются информацией, чтобы эффект взаимодействия контроллеров ESP и системы рулевого управления с наложением угла поворота был оптимальным.

Концепция безопасности
Все используемые внутренние и внешние сигналы непрерывно контролируются блоком управления, проверяется их правдоподобность. Если сигнал датчика больше не кажется правдоподобным, то дополнительная функция рулевого управления, на базе которой работает датчик, деактивируется. Например, при отказе датчика поворота автомобиля вокруг вертикальной оси отключается измерение угла поворота автомобиля вокруг вертикальной оси системы рулевого управления с наложением угла поворота. Переменное передаточное отношение остается активным.

Если безопасная активация электродвигателя больше невозможна из-за сбоя, то система полностью выключается, и обеспечивается непосредственный сквозной привод рулевого механизма от рулевого колеса путем самоторможения шестеренчатой ступени и электромеханической блокировки. Этот переход на аварийный режим также активируется при остановке ДВС или отключении электропитания, что позволяет, к примеру, отбуксировать автомобиль.

Рулевое управление с усилителем для грузовых автомобилей

Рулевое управление полностью гидравлического типа

Гидростатические системы рулевого управления представляют собой системы рулевого управления с гидроусилителем. Рулящее усилие водителя гидравлически усиливается и исключительно гидравлически передается на управляемые колеса. Поскольку механическая связь отсутствует, то максимально допустимая скорость ограничивается региональным законодательством. В Германии она составляет 25 км/ч. В зависимости от конфигурации системы и свойств аварийного рулевого управления возможно увеличение скорости до 62 км/ч. Поэтому использование этих систем ограничивается спецтехникой.

Рулевое управление с одноконтурным гидроусилителем для грузовых автомобилей

Грузовые автомобили обычно оснащаются рулевым управлением с шариковой гайкой (рис. 12). Управляющий клапан встроен в рулевой механизм и вместе с червячной передачей образует единый блок. Вращающее движение рулевого колеса передается по бесконечной цепи рециркулирующих шариков на шариковую гайку. Короткие зубья на шариковой гайке входят в зацепление с зубьями сектора. Создаваемое вращательное движение сектора через рулевой рычаг передается на рулевой привод управляемых колес.

Сервоусилие прилагается так же, как и в реечном рулевом механизме с усилителем – поворотным золотниковым клапаном. Рабочий цилиндр образуется уплотняющей поверхностью между корпусом шариковой гайки и рулевым блоком. Поскольку снаружи корпуса не требуется дополнительных трубопроводов, создается прочный и компактный рулевой блок с высокой выходной мощностью.

Двухконтурная система рулевого управления, предназначенная для большегрузных грузовых автомобилей

Двухконтурные системы рулевого управления (рис. 13) требуются тогда, когда необходимые движущие силы на рулевом колесе превышают регламентируемые Правилами ECE-R79 [1] при отказе усилителя рулевого управления. Эти системы рулевого управления отличаются гидравлической избыточностью. Оба контура рулевого управления в

этих системах функционально испытываются с помощью индикаторов расхода, и водителю сигнализируется состояние сбоя. Насосы для запитывания независимых контуров рулевого управления должны иметь разные приводы (например, от двигателя, от устройства, работа которого зависит от скорости движения автомобиля или электропривода). При отказе одного контура, к примеру, из-за сбоя в системе рулевого управления или остановки ДВС, автомобилем можно управлять с помощью рабочего резервного контура в соответствии с требованиями законодательства.

Двухконтурные системы обычно принимают форму рулевого управления с шариковой гайкой с усилителем со встроенным вторым клапаном рулевого управления. Этот второй клапан управляет дополнительно установленным рабочим цилиндром и обеспечивает дублирование существующей сервосистемы в рулевом управлении с шариковой гайкой.

Литература

[1] ECE-R79: Правила сертификации автомобилей в отношении рулевого управления.

***Рис. 13.** Двухконтурная система рулевого управления с усилителем:*
1 – насос гидроусилителя 1, 2 – насос гидроусилителя 2; 3 – бачок 1; 4 – бачок 2; 5 – рабочий цилиндр; 6 – левая камера цилиндра; 7 – правая камера цилиндра; 8 – двухконтурный рулевой клапан

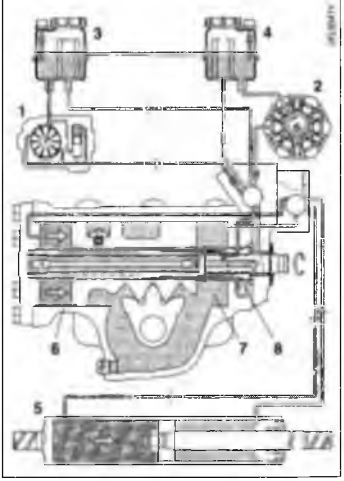
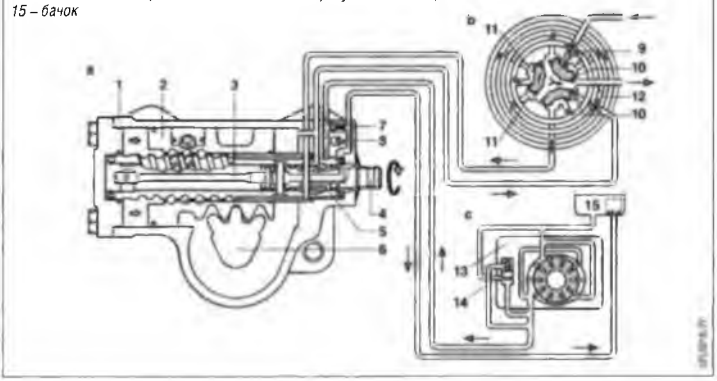


***Рис. 12.** Рулевой механизм с шариковой гайкой с усилителем:*
a – рулевое управление в сборе; b – поперечное сечение распределителя с золотником (увеличено), c – подача жидкости; 1 – картер рулевого механизма; 2 – поршень; 3 – торсион; 4 – вращающийся золотник с рулевым валом; 5 – втулка золотника с винтом; 6 – сектор; 7 – клапан ограничения давления; 8 – подпиточный клапан; 9 – впускной канал; 10 – возвратный канал; 11 – осевой паз; 12 – возвратный паз; 13 – лопастный насос; 14 – нагнетательный и перепускной клапан; 15 – бачок



Тормозные системы

Определения и принципы работы

(по ISO 611 [1] и DIN 70024 [2])

Тормозное оборудование
Тормозные системы, устанавливаемые на транспортное средство и служащие для снижения скорости его движения вплоть до полной остановки или для удержания его в неподвижном состоянии.

Тормозные системы
Рабочая тормозная система
Оборудование, позволяющее водителю снижать скорость движения транспортного средства и останавливать его при обычном режиме эксплуатации.

Запасная тормозная система
Оборудование, позволяющее водителю уменьшать скорость движения транспортного средства и останавливать его при неисправности рабочей тормозной системы.

Стояночная тормозная система
Оборудование, позволяющее удерживать транспортное средство в неподвижном состоянии на наклонной поверхности и при отсутствии водителя.

Вспомогательная тормозная система
Оборудование, позволяющее водителю снижать скорость автомобиля или двигаться по затяжному спуску с постоянной скоростью и практически без износа фрикционных тормозов. Вспомогательная тормозная система непрерывного действия может состоять из одного или нескольких тормозов-замедлителей (ретардеров).

Автоматическая тормозная система
Оборудование, автоматически затормаживающее прицеп при его случайном отделении от тягача.

Электронная тормозная система (ELB, EHB)
Тормозная система, управляемая электрическим сигналом, генерируемым и обрабатываемым системой управления трансмиссией. Электрический выходной сигнал управляет компонентами, генерирующими тормозное усилие.

Компоненты
Энергоснабжающее устройство
Часть тормозной системы, служащая для регулирования и, если необходимо, увеличения усилий, требуемых для торможения. Она ограничена точкой, с которой начинается устройство передачи энергии по различным цепям тормозных систем, включая цепи вспомогательных устройств, если они установлены.

Источником энергии является та часть энергоснабжающего устройства, которая вырабатывает энергию. Он может быть расположен на некотором удалении от транспортного средства, например при использовании пневматической тормозной системы для прицепа. Источником энергии также может служить мускульная сила водителя.

Управляющее устройство
Часть тормозной системы, от которой задается работа и управление этой системой. Управляющий сигнал может передаваться в рамках управляющего устройства различными средствами - например, механическими, пневматическими, гидравлическими или электрическими, включая использование вспомогательной энергии или немускульной силы.

Содержит органы управления и срабатывает от:
- непосредственного воздействия водителя рукой или ногой;
- косвенного вмешательства водителя или без какого-либо его воздействия (только в случае отсоединения буксируемого прицепа);
- изменения давления в соединительном трубопроводе или электрического тока в проводе, между тягачом и прицепом в момент, когда задействуется либо отказывает одна из тормозных систем тягача;
- инерции транспортного средства или его массы или инерции одной из его основных составляющих частей.

Управляющее устройство заканчивается в месте распределения энергии для торможения или ее преобразования.

Передающее устройство (тормозной привод)
Часть тормозной системы, которая передает энергию, распределяемую управляющим устройством. Оно начинается либо в точке, где заканчивается управляющее устройство, либо в точке, где заканчивается энергоснабжающее устройство. Соединяет управляющее

или энергоснабжающее устройство с тормозными механизмами, в которых создаются усилия, направленные против движения автомобиля. Тормозной привод может быть механического, гидравлического, пневматического, вакуумного, электрического или комбинированного, например гидромеханического, гидропневматического типа.

Тормозной механизм
Части тормозной системы, в которых создаются силы, противодействующие движению автомобиля или его тенденции к движению, такие как фрикционные тормоза (дисковые или барабанные) или тормоза-замедлители (гидродинамические или электродинамические замедлители, горные тормоза).

Вспомогательное устройство тягача для прицепа
Часть тормозной системы на тягаче, которая предназначена для передачи энергии к тормозным системам прицепа и для управления ими. Вспомогательное устройство содержит линии управления и передачи энергии с соединительными элементами для тормозной системы прицепа.

Типы тормозной системы применительно к энергоснабжающему устройству
Мускульная тормозная система
Тормозная система, в которой в качестве энергии, необходимой для создания тормозной силы, используется только физическое усилие водителя.

Энергоснабжаемая тормозная система
Тормозная система, в которой в качестве энергии, необходимой для создания тормозной силы, используется усилие водителя и один (или более) дополнительный источник энергии.

Немускульная тормозная система
Тормозная система, в которой в качестве энергии, необходимой для создания тормозной силы, используется один (или более) источник энергии, исключая физическое усилие водителя.
Примечание: тормозная система, в которой водитель автомобиля может увеличить тормозную силу при отключении источников энергии посредством увеличения мускульного усилия, не включена в вышеприведенное определение.

Инерционная тормозная система
Тормозная система, в которой энергия, необходимая для создания тормозной силы, возникает в результате приближения прицепа к тягачу.

Гравитационная тормозная система
Тормозная система, в которой энергия для создания тормозной силы возникает в результате опускания сцепного устройства прицепа, например дышла, благодаря силе тяжести.

Определения, относящиеся к конструкции тормозного привода
Одноконтурная тормозная система
Тормозная система, имеющая тормозной привод, включающий один контур. Он состоит из единственной цепи, в случае неисправности которой никакой энергии для образования тормозной силы не поступит.

Многоконтурная тормозная система
Тормозная система, имеющая тормозной привод, включающий в себя несколько контуров. В случае неисправности одного из контуров энергия для создания тормозной силы может передаваться полностью или частично по исправным контурам такого привода.

Определения тормозных систем, касающиеся автопоездов
Однопроводная тормозная система
Тормозная система автопоезда, при которой используется лишь одна линия для передачи энергии и для управления тормозной системой прицепного звена.

Двух- и многопроводные тормозные системы
Тормозная система автопоезда, при которой для тормозных систем прицепных звеньев используются несколько линий отдельно для передачи энергии и отдельно для управления.

Тормозная система непрерывного действия
Сочетание тормозных систем звеньев автопоезда, при котором:
- водитель со своего рабочего места, воздействуя путем единственной операции непосредственно на управляющее устройство тягача, косвенно приводит в действие и управляющее устройство на прицепе;
- энергия, используемая для торможения каждого из звеньев автопоезда, подается одним источником, которым может быть мускульное усилие водителя транспортного средства;
- производится одновременное или определенное фазовое торможение каждого звена автопоезда.

Тормозная система полунепрерывного действия
Сочетание тормозных систем звеньев автопоезда, при котором:
- водитель с места управления, воздействуя путем единственной операции непосредственно на управляющее устройство тягача, косвенно приводит в действие управляющее устройство прицепа;
- энергия, используемая для торможения каждого из звеньев автопоезда, подается от двух и более различных источников энергии, одним из которых может быть мускульное усилие водителя;
- производится одновременное или определенное фазовое торможение каждого звена автопоезда.

Тормозная система прерывного действия
Сочетание тормозных систем звеньев автопоезда, при котором не используются системы как непрерывного, так и полунепрерывного действия.

Линии управления тормозной системы
Электропроводка и проводники электрического тока: используются для передачи электрической энергии.

Трубопроводы: жесткие, полужесткие или гибкие для передачи гидро- или пневмоэнергии.

Линии, соединяющие тормозное оборудование звеньев автопоездов
Линия передачи: служит для передачи энергии от тягача к устройству накопления энергии на прицепе.

Линия торможения: линия, по которой энергия, предназначенная для управления, передается от тягача к прицепу.

Линия передачи и торможения: служит как для передачи энергии, так и для торможения (одноконтурная тормозная система).

Вторичная линия торможения: линия передачи энергии от тягача к прицепу для торможения прицепа при отказе рабочей тормозной системы.

Механика торможения
Механические явления между началом действия управляющего устройства и концом процесса.

Плавное торможение
Торможение, которое позволяет водителю автомобиля в любой момент повысить или понизить с достаточной степенью точности тормозное усилие посредством управляющего устройства. При увеличении силы торможения за счет усиления действия устройства управления обратное действие должно приводить к уменьшению этой силы.

Гистерезис тормозной системы: разность сил на органе управления.

Тормозной гистерезис: разность приводных сил, создающих одинаковые тормозные моменты в режимах включения и выключения тормозов.

Действующие силы и моменты
Сила управления F_c. сила, воздействующая на управляющее устройство.

Приводная сила F_s: результирующая сила во фрикционных тормозах, прикладываемая к тормозной накладке и создающая тормозную силу с помощью эффекта трения в тормозном механизме.

Тормозной момент: момент, создаваемый силами трения относительно оси вращения колеса.

Результирующая тормозная сила F_t: сумма тормозных сил, возникающих между колесами и дорожным покрытием при торможении.

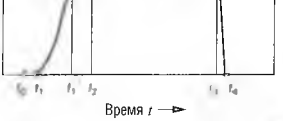
Распределение тормозных сил: тормозные силы, приложенные к соответствующему мосту автомобиля; задаются в процентах от результирующей тормозной силы F_t. Например, передний мост – 60%, задний мост – 40%.

Тормозной коэффициент C^*: определяет взаимосвязь между результирующей окружной силой, приложенной на эффективном радиусе конкретного тормозного механизма, и приводной силой.

$$C^* = F_u / F_s ,$$

F_u – общая периферийная сила, F_s – приводная сила.

Рис. 1. Время и замедление при торможении до полной остановки



до t_0. *Время реакции водителя*
t_0: *начало приложения силы к управляющему устройству. Управляющее устройство*
t_1 *начало замедления;*
t_1' *время окончания нагнетания давления,*
t_2: *начало установившегося замедления;*
t_3: *окончание установившегося замедления,*
t_4: *конец торможения (неподвижный автомобиль),*
$t_1 - t_0$: *время первоначального срабатывания тормозной системы;*
$t_1' - t_1$ *время нарастания замедления,*
$t_3 - t_2$. *диапазон установившегося замедления,*
$t_4 - t_1$. *время активного торможения;*
$t_4 - t_0$ *время полного торможения*

Среднее значение приводной силы рассчитывается при наличии отклонений приводных сил на отдельных тормозных колодках (i – количество тормозных колодок):

$$F_s = \Sigma F_{si} / i .$$

Периоды времени

Время реакции водителя (см. рис. 1): время между обнаружением водителем условий, при которых необходимо тормозить, и моментом начала использования тормозной системы (t_0).

Время срабатывания органа управления: затраченное время между моментом, когда орган управления управляющего устройства, на который действует управляющая сила, приходит в движение, и моментом, когда он достигает своего конечного положения, соответствующего прикладываемой управляющей силе. (Это так же справедливо для нажатия и отпускания тормозов.)

Время первоначального срабатывания тормозной системы $t_1 - t_0$: время между моментом, когда орган управления устройства, на который начинает действовать управляющая сила, начинает движение, и моментом возникновения тормозной силы.

Время нарастания замедления $t_1' - t_1$: время между моментом начала действия силы торможения и моментом достижения определенной ее величины (75% асимптотической величины давления в колесном тормозном цилиндре; определено в ЕЭС 71/32032.4, Приложение III/2.4).

Время реагирования тормозной системы: сумма времени первоначальной реакции и времени нарастания замедления, используемая для оценки поведения тормозной системы во времени.

Время активного торможения $t_4 - t_1$: время между моментом начала действия тормозной силы и моментом прекращения ее действия. Если автомобиль остановился до прекращения действия тормозной силы, то момент окончания движения определяет конец времени активного торможения.

Время растормаживания: время между моментом начала отпускания органа управления

и моментом прекращения действия тормозной силы.

Время полного торможения $t_4 - t_0$: время между моментом начала движения органа управления управляющего устройства и моментом прекращения действия тормозной силы. Если автомобиль остановился до прекращения действия тормозной силы, то момент окончания движения определяет конец времени активного торможения.

Тормозной путь s
Расстояние, проходимое автомобилем в течение времени полного торможения. Сумму тормозного пути и пути, проходимого за время реакции водителя, называют «остановочным путем».

Работа тормозных сил W
Это интеграл произведения мгновенной результирующей тормозной силы F_t и элементарного перемещения ds на участке тормозного пути s:

$$W = \int_0^s F_t \, ds$$

Мгновенная мощность P, расходуемая на торможение
Произведение мгновенной результирующей тормозной силы F_t и скорости движения автомобиля v:

$$P = F_t \, v .$$

Замедление при торможении
Уменьшение скорости под воздействием тормозной системы за рассматриваемый промежуток времени t. Различают:

Мгновенное замедление при торможении

$$a = dv/dt .$$

Среднее замедление за промежуток времени: среднее замедление за промежуток времени от t_B до t_E равно

$$a_{mt} = \frac{1}{t_E - t_B} \int_{t_B}^{t_E} a(t)\, dt .$$

Это значит, что:

$$a_{mt} = \frac{v_E - v_B}{t_E - t_B} ,$$

где v_B и v_E - скорость автомобиля в моменты времени t_B и t_E.

Среднее замедление за пройденный путь: Среднее замедление за пройденный путь между точками s_B и s_E:

$$a_{ms} = \frac{1}{s_E - s_B} \int_{s_B}^{s_E} a(s)\, ds .$$

Это значит, что:

$$a_{ms} = \frac{v_E^2 - v_B^2}{2\,(s_E - s_B)} ,$$

где v_B и v_E – скорости автомобиля при движении в точках s_B и s_E.

Среднее замедление за весь тормозной путь: среднее замедление при торможении вычисляется с помощью уравнения:

$$a_{ms0} = \frac{-v_0^2}{2\,s_0} ,$$

где v_0 относится ко времени t_0 (особый случай с a_{ms}, где $s_E = s_0$).

Среднее установившееся замедление d_m: среднее установившееся замедление за пройденное расстояние определяется условиями $v_B = 0{,}8\,v_0$ и $v_E = 0{,}1\,v_0$, следовательно:

$$d_m = \frac{v_B^2 - v_E^2}{2\,(s_E - s_B)}$$

Среднее установившееся замедление используется в Правилах ЕСЕ 13 [6] в качестве меры эффективности тормозной системы. Поскольку здесь используются положительные значения d_m, то математический знак в данном случае обратный. (Чтобы установить взаимосвязь между тормозным путем и замедлением при торможении, оно должно быть выражено в виде функции от пройденного пути.)

Тормозной фактор z
Отношение между тормозной силой F_t и допустимым статическим весом G_s, приходящимся на ось или оси автомобиля:

$$z = F_t / G_s .$$

Законодательные нормы

Тормозная система автомобиля может быть сертифицирована только при выполнении требований следующих законодательных норм:
- §41 StVZO [4] (Правила регистрации автомобилей в Германии) в увязке с §72 StVZO [5] и соответствующими директивами;
- Директива Евросоюза (RREG) 71/320/EEC [3], с дополнениями и приложениями;
- Правила ECE R13 [6], R13H [7], R78 [8].

В §41 StVZO требования к тормозной системе различаются в зависимости от типа, полной массы автомобиля, области применения, даты регистрации и обусловленной типом максимальной скорости. В директивах ЕС требования распределяются по отдельным категориям автомобилей. Категории автомобилей следующие (см. также «Систематизация автотранспортных средств»):
- M_1, M_2, M_3: легковые автомобили с числом колес не менее 4;
- N_1, N_2, N_3: грузовые автомобили с числом колес не менее 4;
- O_1, O_2, O_3, O_4: прицепы и полуприцепы;
- L_1, L_2, L_3, L_4: мотоциклы, трехколесные транспортные средства.

Значения, прописанные в §41 StVZO в отношении среднего установившегося замедления, не применяются, например, к регулярным проверкам зарегистрированных транспортных средств, проводимым в Германии на дорогах (общий осмотр, проверка безопасности). Для этих проверок применяются требования §29 StVZO [9], с. 1, Приложение VIII в сочетании с Приложением VIIIa, Директива по проведению общей проверки и Директива по проведению проверки безопасности.

Требования в §41 StVZO и ECE-R13H в отношении оборудования тормозных систем по сути идентичны. Однако Правила ECE R13, R13H и R78 были дополнены и теперь содержат, к примеру, правила в отношении электронно-управляемых тормозных систем. Предписанные эффекты торможения должны определяться в соответствии с Директивой 71/320/EEC, с. 1.1.2, Приложение II, измененной Директивой 98/12/EC [10], или в соответствии с §41 StVZO, с. 12.

Требования к тормозным системам
(согласно §41 StVZO, Директива ЕС 71/320/EEC, ECE-R13, по состоянию на 2009 год)
Автомобили категорий M и N должны соответствовать требованиям, относящимся к рабочей, запасной и стояночной тормозным системам. Эти три тормозные системы могут иметь общие компоненты. Такие автомобили должны иметь не менее двух взаимно независимых устройств управления тормозными системами, одна из которых должна быть блокируемой. Устройства управления должны быть снабжены отдельными передаточными устройствами, каждое из которых должно быть способно продолжать работу при отказе остальных. Распределение тормозных сил между отдельными осями предписано законодательно и должно быть направленным. В случае сбоя должна обеспечиваться возможность достижения предписанного запасного тормозного эффекта с оставшейся рабочей частью тормозной системы или другой тормозной системы автомобиля, так чтобы автомобиль не покидал свою полосу движения.

Автомобили категорий M_2 и N_2 и выше должны оснащаться антиблокировочными тормозными системами (ABS). Согласно Постановлению ЕС 661/2009 [11], с 1 ноября 2011 года все новые модели автомобилей, а с 2014 года – все новые автомобили категорий M_1 и N_1 должны оснащаться электронной системой динамической стабилизации (ESP). Это постановление, за исключением внедорожников, согласно Директиве 2007/46/EC [12], Приложение II, часть A, применяется к автомобилям следующих категорий:
- M_2 и M_3, кроме автомобилей с более чем тремя осями, сочлененных автобусов и автобусов категорий 1 или A;
- N_2 и N_3, кроме автомобилей с более чем тремя осями, тягачей со снаряженной массой от 3,5 до 7,5 т и автомобилей специального назначения согласно Директиве 2007/46/EC, Приложение II, Часть A;
- O3 и O4, с пневматической подвеской, кроме автомобилей с более чем тремя осями, прицепов для крупнотоннажных перевозок и прицепов с отсеками для стоящих пассажиров.

Реализация этого Постановления для разных категорий автомобилей, кроме категорий M_1 и N_1, определена в Постановлении ЕС 661/2009 [11], Приложение V, и изложена в таблицах 1 и 2.

Вспомогательные тормозные системы

Вспомогательные тормозные системы дополнительно используются для снятия напряжения с рабочей тормозной системы на затяжных спусках. Автомобили категории M_3 для локальных и дальних перевозок (автобусы массой более 5,5 т (кроме городских)) и прочие автомобили категорий N_2 и N_3 снаряженной массой более 9 тонн (Директива 71/320/EEC, §41 StVZO, с. 15) должны быть оснащены тормозом-замедлителем. Горные тормоза (устройства для замедления движения за счет дросселирования выхлопа) и схожие с ними устройства классифицируются как замедлители. Тормоз-замедлитель должен быть рассчитан на удержание полностью загруженного автомобиля при движении по спуску 7 % на расстояние 6 км со скоростью 30 км/ч.

Прицепы категории О

Прицепам категории O_1 не требуется собственная тормозная система; достаточно надежного соединения с тягачом. Прицепы категории O_2 и выше должны оснащаться рабочей и стояночной тормозными системами, у которых могут быть общие компоненты. Распределение тормозных сил между отдельными осями предписано Директивой 71/320/EEC. Распределение между осями должно быть направленным.

Прицепы категории O_3 и выше (ECE), а также прицепы и полуприцепы со снаряженной массой более 3,5 т и максимальной скоростью более 60 км/ч (§41b StVZO, с. 2), должны оснащаться антиблокировочной тормозной системой. Полуприцепы должны оснащаться ABS, если максимальная нагрузка на седло превышает 3,5 т.

Прицепы категории O_3 (существующие типы), которые будут допущены к эксплуатации после 11.07.2014 или 01.11.2014, должны быть оснащены электронной системой динамической стабилизации (ESP). Для новых типов прицепов эти правила уже применяются с 01.11.2011 или с 11.07.2012 (Правила ЕС 661/2009 [11], Приложение V, см. Таблицы 1 и 2).

Прицепы категории O_2 и ниже должны оснащаться инерционными тормозными системами. Прицеп должен тормозить автоматически, если во время движения он окажется отсоединен от тягача, или (у прицепов массой менее 1,5 т) должен быть оснащен надежным соединением с тягачом.

Автомобили категории L

Двух- и трехколесные транспортные средства, приводимые в движение двигателем, должны иметь две взаимно независимые тормозные системы. На тяжелых трехколесных транспортных средствах категории L_5 обе тормозные системы должны действовать на два колеса. Должна быть установлена стояночная тормозная система.

Таблица 1. Данные о вступлении в силу требований к тормозным системам для новых типов автомобилей в соответствии с ЕС 661/2009, Приложение V [11]

Категория автомобилей		Дата вступления в силу
M_2		11. 07. 2013
M_3	Категория III	1. 11. 2011
M_3	< 16 т, пневматический привод	1. 11. 2011
M_3	Категория II и B, гидравлический привод	11. 07. 2013
M_3	Категория III, гидравлический привод	11. 07. 2013
M_3	Категория III, пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11. 07. 2014
M_3	Категория II, пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11. 07. 2014
M_3	(разное)	1. 11 2011
N_2	Гидравлический привод	11. 07. 2013
N_2	Пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11 07 2014
N_2	(разное)	11. 07. 2012
N_3	Тягачи с 2 осями	1 11. 2011
N_3	Тягачи с 2 осями и пневматической передачей сигнала (ABS)	1. 11. 2011
N_3	3-осные с электронной передачей сигнала (EBS)	1. 11. 2011
N_3	2 и 3-осные с пневматической передачей сигнала (ABS)	11 07. 2012
N_3	(разное)	1. 11. 2011
O_3	Комбинированная нагрузка на ось от 3,5 до 7,5 т	11. 07. 2012
O_3	(разное)	1 11 2011
O_4		1 11 2011

Автомобили-тягачи и прицепы с пневматическими тормозными системами

Средства подачи сжатого воздуха должны быть двух- или многопроводными. Это обеспечивает возможность использования пневматической тормозной системы прицепа при торможении. При работе рабочей или запасной тормозной системы автомобиля-тягача совместимая с ней тормозная система прицепа должна работать плавно. В случае какой-либо неисправности в рабочей тормозной системе автомобиля-тягача тормозные компоненты прицепа, не срабатывающие при таком отказе, должны плавно затормозить прицеп. Если один из трубопроводов между тягачом и прицепом разрывается или в нем происходит значительная утечка, то прицеп должен автоматически затормаживаться.

Аккумуляторы энергии рабочих тормозных систем должны иметь такую конструкцию, чтобы после восьми полных срабатываний рабочего тормоза, на девятом торможении обеспечивался, как минимум, необходимый эффект запасного торможения. Аккумуляторы энергии не должны восполняться во время этого испытания. Эффект торможения отдельных автомобилей предписывается в виде функции давления на соединительной головке тормозных шлангов в Директиве 71/320/EEC.

Автомобили с ABS

Антиблокировочные системы (ABS) должны соответствовать Директивам 71/320/EEC, Приложение X и ECE-R13, Приложение 13. Антиблокировочная система – это часть рабочей тормозной системы, автоматически контролирующей пробуксовку одного или нескольких колес при торможении. Требования к ABS зависят от категории транспортного средства. Для автомобилей это категории I, II и III, а для прицепов – категории «A» и «B».

Основные требования к ABS (категория I):

- отсутствие блокировки косвенно контролируемых колес при скоростях свыше 15 км/ч, независимо от дорожного покрытия;
- сохранение курсовой устойчивости и маневренности. В состоянии μ-сплита (крайне большая разность коэффициентов трения между левым и правым колесами), допустимы корректировки рулевого управления на 120° в течение первых двух секунд и на 240° в сумме;
- должна быть специальная система визуальной сигнализации сбоев электрики (желтый предупреждающий сигнал);
- автомобили (кроме категорий M_1 и N_1) с ABS, оборудованные для движения с прицепом с ABS, должны быть оснащены отдельной системой визуальной сигнализации для прицепа (желтый предупрежда-

Таблица 2. Данные о вступлении в силу требований к тормозным системам для новых автомобилей в соответствии с ЕС 661/2009, Приложение V [11]

Категория автомобилей		Дата вступления в силу
M_2		11. 07 2015
M_3	Категория III	1. 11 2014
M_3	< 16 тонн, пневматический привод	1. 11. 2014
M_3	Категория II и B, гидравлический привод	11. 07. 2015
M_3	Категория III, гидравлический привод	11. 07. 2015
M_3	Категория III, пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11. 07. 2016
M_3	Категория II, пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11. 07. 2016
M_3	(разное)	1. 11. 2014
N_2	Гидравлический привод	11. 07. 2015
N_2	Пневматическая передача сигнала и гидравлический привод	11 07 2016
N_2	(разное)	11. 07 2014
N_3	Тягачи с 2 осями	1. 11 2014
N_3	Тягачи с 2 осями и пневматической передачей сигнала (ABS)	1 11 2014
N_3	3-осные с электронной передачей сигнала (EBS)	1 11 2014
N_3	2 и 3-осные с пневматической передачей сигнала (ABS)	11 07 2014
N_3	(разное)	1. 11 2014
O_3	Комбинированная нагрузка на ось от 3,5 до 7,5 т	11. 07. 2014
O_3	(разное)	1 11. 2014
O_4		1 11 2014

ющий сигнал). Передача должна осуществляться через контакт 5 электрического штекерного разъема ISO 7638 [13];
- энергоаккумуляторы рабочей тормозной системы автомобилей с ABS должны иметь такую конструкцию, чтобы предписанный эффект запасного торможения достигался даже после более длительного управляемого торможения ($t = v_{max}/7$, не менее 15 с) и затем четырех неуправляемых полных торможений без восполнения энергии.

Требования и условия испытаний

Необходимые значения и условия испытаний должны применяться во время испытаний в соответствии с §19 [14] и §20 StVZO [15]. Допускаются отклонения от метода испытаний, описанного в Директиве 71/320/EEC, Приложение II, с. 1.1.2, дополненной Директивой 98/12/EC и метода испытаний, описанного в §41 StVZO, с. 12 – в частности, при проведении контрольных проверок в соответствии с §29 StVZO – если условия и эффект могут быть выяснены другими средствами (§41 StVZO, с. 12). При проверке автомобилей, которые ставятся на учет впервые, должно достигаться большее замедление при торможении, соответствующее обычному снятию эффекта торможения; кроме того, должно гарантироваться достаточное, современного уровня, непрерывное торможение для более длинных спусков (Табл. 3–6).

Минимальное замедление и максимально допустимые управляющие силы во время общего осмотра согласно §29 StVZO

В таблицах 5, 6 и 7 дан обзор необходимых значений замедления и максимальных усилий на устройстве управления во время общего осмотра и проверок систем безопасности в соответствии с §29 StVZO [9], Приложение VIII и Приложение VIIIa. Необходимые значения замедления определяются на испытательных стендах и лишь в исключительных случаях – в дорожных испытаниях. Необходимые значения – это максимальные значения, потому что время, требуемое для определения среднего установившегося замедления, не измеряется на этих регулярных осмотрах.

Таблица 6 применяется к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации после 1 января 1991 года (вступление в силу §41 StVZO, с. 18 в сочетании с §72 StVZO, с. 2). Значения в скобках применяются к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации до 1 января 1991 года. Если для этих автомобилей не указано значений в скобках, то применяются значения из табл. 7. Таблица 7 применяется к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации до 1 января 1991 года и автомобилям, для которых в табл. 6 не указано значений в скобках. Значения, приведенные в табл. 8 применяются к проверкам систем безопасности.

Таблица 3. Необходимые значения для среднего установившегося замедления согласно § 41 StVZO [4] (извлечение: по состоянию на 2009 год)

Тип и описание автомобиля	Рабочая тормозная система	Стояночная тормозная система
Транспортные средства, кроме мотоциклов, с обусловленной типом максимальной скоростью > 25 км/ч, впервые поставленные на учет после 01.01.2001.[1 7)]	5,0 м/с²	1,5 м/с²
Транспортные средства, кроме мотоциклов, с обусловленной типом максимальной скоростью > 25 км/ч, впервые поставленные на учет до 01.01.2001.[1)]	3,5 м/с²	1,5 м/с²
Транспортные средства, кроме мотоциклов, с обусловленной типом максимальной скоростью > 25 км/ч, впервые поставленные на учет до 01.01 2001.[1)]	2,5 м/с²	1,5 м/с²
Транспортные средства, кроме мотоциклов, с обусловленной типом максимальной скоростью > 25 км/ч, впервые поставленные на учет до 01 01.2001 [1)]	1,5 м/с²	1,5 м/с²
Двух- и многоосные прицепы, за исключением двухосных прицепов с колесной базой менее 1 м, впервые допущенные к эксплуатации после 01.01 2001.[2 6)]	5,0 м/с²	[5)]
Двух- и многоосные прицепы, за исключением двухосных прицепов с колесной базой менее 1,0 м, впервые допущенные к эксплуатации после 01.01.2001[2)] Для прицепов, прицепляемых к тягачам, имеющих скорость < 25 км/ч (инструкции по эксплуатации), если прицеп рассчитан на максимальную скорость не более 25 км/ч.[2 4)]	3,5 м/с²	[5)]
Полуприцепы, впервые допущенные к эксплуатации после 01.01.2001 [3 6)]	4,5 м/с²	[5)]
Полуприцепы, впервые допущенные к эксплуатации до 01.01 2001.[3]	2,5 м/с²	[5)]

[1)] Для всех других транспортных средств – кроме мотоциклов – § 41 StVZO, с. 4 применяется в версии, действительной до 01.04.2000. См. также § 72 StVZO, с. 2

[2)] Для всех других прицепов – кроме двухосных – с колесной базой менее 1,0 м – § 41 StVZO, с. 9 применяется в версии, действительной до 01.04.2000. См. также § 72 StVZO, с. 2.

[3)] Для всех других полуприцепов § 41 StVZO, с. 9 применяется в версии, действительной до 01.04.2000. См. также § 72 StVZO, с. 2

[4)] Идентификация должна выполняться в соответствии с требованиями § 58 StVZO

[5)] Тормоз должен быть блокируемым. Заблокированный тормоз должен использовать исключительно механические средства для защиты полностью загруженного прицепа от откатывания на 18% подъемах и спусках на сухой дороге (§ 41 StVZO, с. 9)

[6)] Тормозная система прицепа должна автоматически останавливать прицеп на 18% подъемах и спусках при отцеплении прицепа от тягача (§ 41 StVZO, с. 9)

[7)] На автомобилях, кроме перечисленных в § 30 a StVZO, с. 3, впервые допущенных к эксплуатации после 01.01.2001, если часть тормозной системы не работает, оставшаяся часть должна обеспечивать возможность достижения не менее 44% тормозящего эффекта, предписанного в § 41 StVZO, с. 4 для рабочего тормоза без выхода автомобиля за пределы своей полосы (§ 41 StVZO, с. 4a и § 72 StVZO, с. 2)

Таблица 4. Требования и условия испытаний тормозных систем согласно Директиве 71/320/EEC [3], ECE-R13 [6], ECE-R13H [7]

Категории автомобилей		Легковые автомобили и автобусы			Грузовые автомобили			Прицепы			
		M_1	M_2	M_3	N_1	N_2	N_3	O_1	O_2	O_3	O_4
Рабочая тормозная система		Действует на всех колесах Задано распределение силы по осям						Отсутствие тормозов или подобно O_2	Имеющиеся тормоза или как O_3		
ABS в соответствии с Директивой ЕС или ECE[1] ($v_{max} \geq 25$ км/ч)		+	+	+	–	+	+	–	–	+	+
Испытания типа «0» (привод отсоединен)											
Испытательная скорость	км/ч	80	60	60	80	60	60	–	60	60	60
Тормозной путь	$\leq$ м	50,7	36,7	36,7	61,2	36,7	36,7		$z \geq 0{,}50$		
Уравнение для тормозного пути		$0{,}1v + \frac{v^2}{150}$			$0{,}15v + \frac{v^2}{130}$				полуприцеп: $z \geq 0{,}45$		
Среднее установившееся замедление	$\geq$ м/с^2	5,8			5,0						
Сила на органе управления	$\leq$ Н	500			700				при $\leq$ 6,5 бар		
Испытания типа «0» (привод отсоединен)		Поведение автомобиля при торможении с 30 % – 80 % v_{max} и эффективность торможения									
Скорость при испытании $v = 80\,\%\ v_{max}$, но	$\leq$ км/ч	160	100	90	120	100	90	–	–	–	–
Тормозной путь	$\leq$ м	212,9	111,6	91,8	157,1	111,6	91,8				
Уравнение для тормозного пути		$0{,}1v + \frac{v^2}{130}$			$0{,}15v + \frac{v^2}{103{,}5}$						
Среднее установившееся замедление	$\geq$ м/с^2	5,0			4,0						
Сила на органе управления	$\leq$ Н	500			700						
Испытание типа I		Повторяющееся торможение на скорости 3 м/с^2 с полной загрузкой, с подключенным приводом						–	Непрерывное торможение, с полной нагрузкой, 40 км/ч, 7 % уклон, 1,7 км, $z \geq 0{,}36$ и $z \geq 60\,\%$ от значения, измеренного при испытании типа «0» при 40 км/ч		–
$v_1 = 80\,\%\ v_{max}$, но	$\leq$ км/ч	120	100	60	120	60	60				
$v_2 = {}^1/_2\ v_1$											
Количество циклов торможения	n	15	15	20	15	20	20				
Длительность цикла торможения	с	45	55	60	55	60	60				
Эффективность торможения в конце испытания типа «I»		$\geq$ 80 % эффективности торможения, предписанной для испытаний типа «0» (привод отсоединен) и $\geq$ 60 % от достигнутой эффективности торможения в испытании типа «0» (привод отсоединен)									
Испытание типа II на затяжных спусках		Энергия, соответствующая 30 км/ч, 6% спуск на 6 км, с полной загрузкой, включенным приводом, работающей тормозной системой непрерывного действия. Измеряется, как для испытания типа «0» (привод отсоединен)									при 40 км/ч
Эффективность торможения в конце испытания типа «II»											
Уравнение для тормозного пути		$M_3: 0{,}15v + \frac{1{,}33v^2}{130}$			$N_3: 0{,}15v + \frac{1{,}33v^2}{115}$			–	–	–	
Тормозной путь	$\leq$ м			45,8			50,6				
Среднее установившееся замедление	$\geq$ м/с^2	–	–	3,75	–	–	3,3				$z \geq 0{,}33$

[1] Исключения допускаются для более ранних моделей.

Таблица 4 (продолжение). Требования к тормозным системам и условия испытаний

Категория автомобилей		Легковые автомобили и автобусы			Грузовые автомобили			Прицепы			
		M_1	M_2	M_3	N_1	N_2	N_3	O_1	O_2	O_3	O_4
Испытание типа IIa Для тормозных систем дополнительного замедления		Энергия, соответствующая 30 км/ч, 7% спуск на 6 км, с полной загрузкой, только с работающей тормозной системой непрерывного действия. Разрешается только с M_3 [2] и для буксировки O_4, N_3.									
Испытание типа III		–						–	–	–	[3]
Остаточный эффект торможения После отказа системы привода / тормозного контура, привод отсоединен								Тормоза прицепа должны быть полностью или частично рабочими с эффектом плавного торможения			
Испытательная скорость	км/ч	80	60	60	70	50	40				
Тормозной путь, с грузом	≤ м	150,2	101,3	101,3	152,5	80	52,4				
Тормозной путь, без груза	≤ м	178,7	119,8	101,3	180,9	94,5	52,4				
Среднее установившееся замедление, с грузом	≥ м/с²	1,7	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3				
Без груза	≥ м/с²	1,5	1,3	1,5	1,1	1,1	1,3				
Сила на органе управления	≤ Н	700	700	700	700	700	700				
Запасная тормозная система (испытывается как для типа «0», привод отключен)								Тормоза прицепа должны быть рабочими с эффектом плавного торможения			
Испытательная скорость	км/ч	80	60	60	70	50	40				
Тормозной путь	≤ м	93,3	64,4	64,4	95,7	54,0	38,3				
Уравнение для тормозного пути		$\frac{0{,}1v}{+\frac{2v^2}{150}}$	$0{,}15v+\frac{2v^2}{130}$		$0{,}15v+\frac{2v^2}{115}$						
Среднее установившееся замедление	≥ м/с²	2,5			2,2						
Активирующая сила, вручную	≤ Н	400	600		600						
ногой	≤ Н	500	700		700						
Стояночная тормозная система (испытание с полной нагрузкой)											
Удержание неподвижного состояния на уклоне (спуске или подъеме)	≥ %	18			18			–	18		
Вместе с расторможенными прицепами категории О	≥ %	12			12			–	–		
Активирующая сила, вручную	≤ Н	400	600		600			–	600		
ногой	≤ Н	500	700		700			–	–		
Испытание типа «0» [4] (привод отключен, с грузом)											
Испытательная скорость	км/ч	80	60	60	70	50	40	–			
Среднее максимальное замедление до полной остановки	≥ м/с²	1,5			1,5			–			
Автоматическая тормозная система С пневматическими системами, автоматическое торможение прицепа при потере давления в линии подачи											
Испытательная скорость	км/ч							–	40,0		
Тормозной коэффициент	≥ %							–	13,5		

[2] Кроме городских автобусов

[3] Повторяющееся торможение, как для испытаний типа I для N_3. После этого эффективность торможения ≥ 40 % и ≥ 60 % от уровня, достигнутого в испытании типа «0»

[4] Со стояночной тормозной системой или через вспомогательное устройство управления для рабочей тормозной системы

Таблица 5 Минимальное замедление и максимально допустимые управляющие силы во время общего осмотра согласно § 29 StVZO [9]

Применяется к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации после 1 января 1991 года (вступление в силу § 41 StVZO, с. 18 в сочетании с § 72 StVZO, с. 2). Значения в скобках применяются к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации до 1 января 1991 года. Если для этих автомобилей не указано значений в скобках, то применяются значения из табл. 6.

Категории автомобилей		Рабочая тормозная система				Стояночная тормозная система		
		Тормозной фактор			Сила, создаваемая рукой	Усилие нажатия педали	Замедление	Сила, создаваемая рукой	Усилие нажатия педали
		%			в Н	в Н	%	в Н	в Н
M_1	Легковые автомобили, автодома	50			–	500	16 (15)	400	500
M_2, M_3	Автобусы	50 (48) [1]			–	700	16 (15)	600	700
L_5	3-х колесные автомобили снаряженной массой до 1000 кг	45			200	500	15	200	500
N_1	Грузовики/тягачи снаряженной массой до 3,5 т	50 (45) [2]			–	700	16 (15)	600	700
N_2, N_3	Грузовики/тягачи снаряженной массой более 3,5 т	45 (43) [2]			–	700	16 (15)	600	700
O_3	Прицепы и полуприцепы								
	до 25 км/ч	25			–	–	15	600	–
	более 25 км/ч	43 (40)			$p_m \leq$ 6,5 бар	$p_m \leq$ 6,5 бар	16 (15)	600	–
L	Тягачи $v_{max} \leq$ 30 км/ч	35			400	600	15	400	600
	Мотоциклы (при испытании с пассажиром / без пассажира)	F	r	f&r					
L_2									
L_3	3-колесные / ≤ 50 км/ч	15 [4]	15 [4]	35/40 [5]	200	400	–	–	–
L_4	2-колесные / > 50 км/ч	35	30	50	200	500	–	–	–
	3-колесные / асимм. / > 50 км/ч	–	–	45	200	500	–	–	–
	Прочие автомобили								
	≤ 25 км/ч	25			–	700	15	600	700
	> 25 км/ч	40			–	700	16 (15)	600	700
		Эффективность торможения вспомогательной тормозной системы (см. Директива 71/320/EEC Приложение II)							
M_3	$G \leq$ 10 т	как тип II							
M_3	$G >$ 10 т	как тип II a							
N_3		как тип II							

G – снаряженная масса, f – передняя ось, r – задняя ось, f&r – передняя и задняя оси, p_m – давление на соединительной головке тормозных шлангов

[1] Значения для автомобилей, проверенных и допущенных к эксплуатации до 1 января 1991 года

[2] Для автомобилей с высотой центра тяжести относительно колесной базы $h/E \geq 0{,}5$ достаточным является замедление 40%. [3] Только для прицепов категории O1 при наличии тормозной системы,

[4] Только при наличии независимых тормозных систем для передних и задних колес [5] 35% для асимметрично расположенных и 40% для симметрично расположенных колес. [6] снаряженная масса ≤ 2,5 т

[7] > Снаряженная масса 2,5 т

Таблица 6. Минимальное замедление и максимально допустимые управляющие силы во время общего осмотра согласно § 29 StVZO [9]

Применяется к автомобилям, проверенным и допущенным к эксплуатации до 1 января 1991 года и автомобилям, для которых в табл. 5 не указано значений в скобках.

Категории автомобилей	Рабочая тормозная система			Запасная тормозная система			Стояночная тормозная система		
	Замедление в %	Сила, создаваемая рукой в Н	Усилие нажатия педали в Н	Замедление в %	Сила, создаваемая рукой в Н	Усилие нажатия педали в Н	Замедление в %	Сила, создаваемая рукой в Н	Усилие нажатия педали в Н
Двухколесные транспортные средства	30	250	500	–	–	–	–	–	–
Автомобили									
≤ 25 км/ч	25	–	80	20	40 [1]	80	20	40 [1]	80
> 25 км/ч	40	–	80	20	60 [2]	80	20	60 [2]	80
Прицепы									
≤ 25 км/ч	25	40	–	–	–	–	20	60	–
> 25 км/ч	40	40	–	–	–	–	20	60	–

Таблица 7. Минимальное замедление и максимально допустимые управляющие силы во время проверки систем безопасности согласно § 29 StVZO [9]

Категории автомобилей		Рабочая тормозная система			Стояночная тормозная система		
		Замедление в %	Сила, создаваемая рукой в Н	Усилие нажатия педали в Н	Замедление в %	Сила, создаваемая рукой в Н	Усилие нажатия педали в Н
M		48	–	700	15	60	70
N		43	–	700	15	60	70
O	Прицепы						
	≤ 25 км/ч	25	–	–	15	–	–
	> 25 км/ч	40	$p_m \leq$ 6,5 бар	$p_m \leq$ 6,5 бар	15	60	–
	Автомобили						
	≤ 25 км/ч	24	–	70	15	60	70
	> 25 км/ч	40	–	70	15	60 [2]	70

[1] Снаряженная масса ≤ 2,5 т

[2] Снаряженная масса > 2,5 т.

Структура и устройство тормозных систем

Основные требования

Тормозные системы в автомобилях должны отвечать требованиям Директивы 71/320/EEC, ECE-R13 часть 1, ECE-R13 часть 2 и ECE-R13 H и другим региональным предписаниям. Автомобили должны оснащаться двумя отдельными тормозными системами, одна из которых должна быть блокируемой. Тормозные системы должны иметь отдельные устройства управления. В случае сбоя в рабочей тормозной системе должна сохраняться возможность торможения, как минимум, двух колес (на одной оси).

Типы тормозных систем

Тормозные системы состоят из рабочей и стояночной тормозных систем и (у грузовиков и автобусов) вспомогательной тормозной системы (тормоза-замедлителя). Требуемая система запасного торможения обычно используется при отказе рабочей тормозной системы. Автомобили специального назначения с особыми требованиями тоже могут иметь специальные функции торможения, такие как тормоз для движения на крутых подъёмах или тормоз для предотвращения аварий автопоездов.

Тип создания силы

Когда речь заходит о том, как создается сила, различают три типа создания силы: с мускульной энергией, с мускульной и дополнительной энергией и с немускульной энергией. В системах с мускульной энергией используется только с мускульная сила водителя, в системах с мускульной и дополнительной энергией происходит усиление первой усилителем тормозов, а в системах с немускульной энергией управляющее мускульное усилие водителя служит лишь управляющей переменной. Максимальные необходимые управляющие усилия предписываются для каждого типа автомобиля.

Передающее устройство (тормозной привод)

Сила передается от управляющего устройства на тормоза колес механически, гидравлически, пневматически или электрически. Механическая передача силы является стандартной и предписывается только для стояночных тормозных систем (§ 41 StVZO, с. 5).

Передача силы у рабочей тормозной системы выполняется через два отдельных тормозных контура гидравлически или пневматически, так чтобы, как минимум, один тормозной контур остается рабочим в случае сбоя.

Электрическая активация тормозов до сих пор использовалась только в электрических стояночных тормозных системах (см. «Электромеханические стояночные тормозные системы»).

Схемы двухконтурных тормозных приводов

Конфигурация тормозных контуров регламентируется стандартом DIN 74000 [16]. У автомобилей категории M (легковые автомобили), конфигурация тормозных контуров часто диагональная (рис. 2, b). Но это возможно только в сочетании с подходящей геометрией передней оси (отрицательное или нейтральное плечо обката). У всех остальных категорий автомобилей используется конфигурация II (рис. 2, a). Здесь передняя ось образует один из тормозных контуров, а задняя ось образует другой. Все прочие конфигурации тормозных контуров стандарта DIN 74000 сегодня редко используются и поэтому больше здесь не описываются. Прямая необходимость в двухконтурном тормозном приводе предписывается в § 41 StVZO, с. 16 только для автобусов.

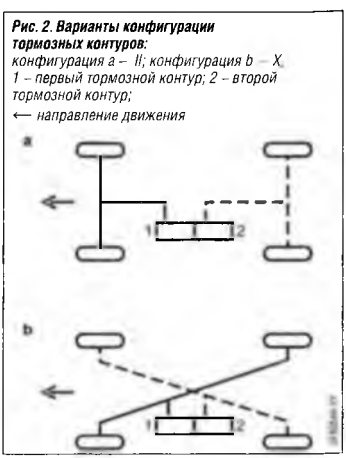


Рис. 2. Варианты конфигурации тормозных контуров:
конфигурация a – II; конфигурация b – X;
1 – первый тормозной контур; 2 – второй тормозной контур;
← направление движения

Распределение тормозных сил

Директивы 71/320/EEC, ECE-R13 и ECE-R13H также предъявляют требования к распределению тормозных сил между отдельными осями. Тормозные силы должны распределяться направленно во всех режимах нагрузки между осями. На распределение тормозных сил можно повлиять, с одной стороны, через компоновку колесных тормозов, а с другой – через конфигурацию автомобиля. Помимо прочего учитываются высота центра тяжести, колесная база и развесовка.

В грузовых автомобилях, согласно схемам в Директиве 71/320/EEC, распределение тормозных сил также зависит от давления на соединительной головке тормозных шлангов. Распределение тормозных сил через компоновку автомобиля реализуется с помощью ограничителя тормозных сил или автоматического устройства, измеряющего тормозные силы (автоматическое измерение тормозной силы в зависимости от нагрузки).

В современных автомобилях распределение тормозных сил интегрируется в качестве дополнительной функции в электронную систему контроля пробуксовки колес (антиблокировочная система, система динамической стабилизации).

Компоненты

Тормозные системы автомобилей состоят из следующих компонентов, различающихся по конструкции в зависимости от типа системы (гидравлическая или пневматическая): энергетический блок, устройства управления, передающие устройства, инфраструктура управления, колесные тормоза и вспомогательные устройства.

Источники

[1] ISO 611: Автомобили – торможение автомобилей и их прицепов – словарь.
[2] DIN 70024: Словарь по компонентам автомобилей и их прицепов.
[3] Директива ЕС 71/320/EEC: Директива ЕС от 26 июля 1971 года по согласованию законодательства стран-участниц в отношении тормозных систем определенных категорий автомобилей и их прицепов.
[4] §41 StVZO: Тормоза и тормозные колодки.
[5] §72 StVZO: Вступление и переходные положения.
[6] ECE-R13: Стандартные условия сертификации автомобилей категорий M, N и O в отношении тормозов.
[7] ECE-R13H: Стандартные условия сертификации легковых автомобилей в отношении тормозов. Дата вступления в силу: 11 мая 1998.
[8] ECE-R78: Стандартные условия сертификации автомобилей категорий L1, L2, L3, L4 и L5 в отношении тормозов.
[9] §29 StVZO: Осмотр автомобилей и прицепов.
[10] Директива ЕС 98/12/EC Еврокомиссии от 27 января 1998 года, адаптирование к техническому прогрессу, Директива Еврокомиссии 71/320/EEC о согласовании законодательства стран-участниц ЕС в отношении тормозных систем определенных категорий автомобилей и их прицепов.
[11] Правила (ЕС) 661/2009 Европарламента и Совета от 13 июля 2009 года в отношении требований к сертификации автомобилей, их прицепов и систем, компонентов и отдельных технических блоков в плане общей безопасности.
Опубликовано в официальном издании Евросоюза L200 от 31 июля 2009 года.
[12] Директива 2007/46/EC Европарламента и Совета от 5 сентября 2007 года, определяющая рамки для сертификации автомобилей и их прицепов, а также систем, компонентов и отдельных технических блоков таких автомобилей (Рамочная Директива).
[13] ISO 7638: Автомобили – разъемы для электрического подключения тягачей и прицепов.
[14] §19 StVZO: Осуществление и эффективность сертификации конструкции.
[15] §20 StVZO: Общая сертификация различных типов.
[16] DIN 74000: Гидравлические тормозные системы; двухконтурные тормозные системы; символы для схем тормозных контуров.

Конструкции тормозных систем легковых автомобилей

Тормозные системы для легковых и легких коммерческих автомобилей должны соответствовать требованиям различных директив и предписаний – например, ECE R13-H, а в Германии – §41 StVZO (Правила регистрации автомобилей). В них изложены требования к функционированию, эффекту и методам испытаний. Вся тормозная система делится на рабочую, стояночную и запасную.

Рабочая тормозная система

Рабочая тормозная система в легковых и легких коммерческих автомобилях обычно конструируется в виде системы с дополнительным источником энергии. Сила передается через два независимых гидравлических контура (рис. 1).

В случае сбоя, например течи или повреждения трубопровода, работающая часть системы должна сохранять способность достижения как минимум эффекта запасного торможения – с той же управляющей силой на устройстве управления. Должна обеспечиваться возможность измерения эффекта запасного торможения, которое, в свою очередь, должно составлять не менее 50% (ECE R13H) или 44% (§41 с. 4a). Автомобиль не должен вывезжать за пределы своей полосы при задействовании запасного тормоза.

Управляющее устройство

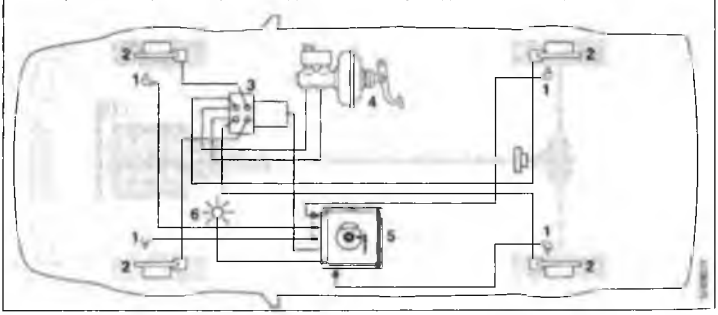
При задействовании рабочего тормоза мускульная сила ноги водителя воздействует на педаль тормоза. Усилителем тормозов это действие усиливается. Усилители тормозов (рис. 2) работают за счет вакуумного либо гидравлического привода. Вакуумный усилитель тормозов получает из впускного трубопровода или от отдельного вакуумного насоса. Гидравлическое усиление тормозов производится от гидроусилителя или от отдельного гидравлического насоса и аккумуляторов давления.

Нажатие педали передается на рычаг и усиливается в усилителе тормозов в зависимости от его конструкции, в 4–10 раз и воздействует на поршень в главном тормозном цилиндре (рис. 3). Управляющее усилие преобразуется в гидравлическое давление. При полном торможении это давление варьируется в диапазоне от 120 до 180 бар, в зависимости от конструкции системы.

Передающее устройство (тормозной привод)

Гидравлическое давление передается тормозной жидкостью по тормозным трубопроводам стандарта DIN 74243 и тормозным шлангам стандарта SAE J 1401 в тормозные цилиндры колес. Тормозная жидкость должна соответствовать требованиям стандарта SAE J 1703 или FMVSS 116.

Рис. 1. Тормозная система с двумя гидравлическими контурами и ABS:
1 – датчики угловых скоростей колес; 2 – колесные тормоза (дисковые тормоза, на заднем мосту могут быть и барабанные тормоза), 3 – гидравлический модулятор (для ABS или ESP); 4 – управляющее устройство с усилителем тормозов и двухконтурным главным тормозным цилиндром; 5 – ЭБУ (может монтироваться прямо на гидравлический модулятор); 6 – сигнализатор ABS



Колесные тормоза

На передних колесах обычно используются дисковые тормоза с плавающим суппортом, но могут использоваться также дисковые тормоза с фиксированным суппортом. На задних колесах используются либо дисковые тормоза с плавающим суппортом со встроенным механизмом блокировки, либо барабанные тормоза Simplex (см. «Колесные тормоза»). На задних колесах также можно использовать сочетания дисковых тормозов с барабанными Duo-Duplex (система «барабан в головке»). В этом случае барабанный тормоз Duo-Duplex, размещаемый в камере тормозного диска, используется исключительно для системы стояночного тормоза. Устройство управления стояночным тормозом может иметь конструкцию в виде рычага ручного тормоза или педали ножного тормоза с механизмом блокировки. Сила передается с помощью тросиков или системы рычагов на колесные тормоза на задней оси, а в редких случаях – и на переднюю ось. В случае электромеханических стояночных тормозных систем тормоз приводится в действие с помощью электрического выключателя (см. «Электромеханическая стояночная тормозная система»).

Рис. 2. Вакуумный усилитель:
1 – толкатель, 2 – вакуумная камера с соединительным штуцером; 3 – диафрагма, 4 – рабочий поршень, 5 – двойной клапан управления; 6 – воздушный фильтр; 7 – толкатель поршня; 8 – рабочая атмосферная камера, 9 – опорная тарелка

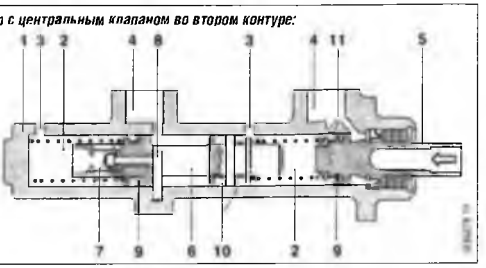


Регулятор тормозного усилия, гидравлический модулятор ABS

Между главным тормозным цилиндром и колесными тормозами расположен гидравлический модулятор ABS или системы динамической стабилизации и, в зависимости от объема функций, регулятор тормозного усилия. Эти компоненты, ограничивая и адаптируя тормозное давление в основном на задней оси, обеспечивают адекватное распределение тормозных сил между передней и задней осями. Эта функция, особенно у автомобилей с заметно разными режимами нагрузки, может выполняться в зависимости от нагрузки (автоматическое измерение тормозных сил в зависимости от нагрузки).

Гидравлический модулятор изменяет тормозное давление во время торможения таким образом, чтобы предотвращать блокирование колес. В зависимости от режима управления эта операция выполняется несколькими электромагнитными клапанами и электрическим насосом. В тормозных системах легковых автомобилей управление передней осью осуществляется отдельно, т.е. каждое колесо тормозится соответственно сцеплению с дорогой. Управление задними колесами осуществляется по принципу наименьшего сцепления, т.е. оба колеса тормозятся с усилием, соответствующим колесу с наименьшим сцеплением с дорогой (см. также «Антиблокировочная система и система динамической стабилизации»).

Рис. 3. Главный тормозной цилиндр с центральным клапаном во втором контуре:
1 – корпус цилиндра;
2 – напорная камера;
3 – напорное соединение,
4 – штуцер для бачка с тормозной жидкостью;
5 – поршень толкателя;
6 – промежуточный поршень,
7 – центральный клапан;
8 – упор центрального клапана,
9 – рабочая манжета,
10 – промежуточная манжета,
11 – компенсационное отверстие



Электромеханическая тормозная система

Стояночная тормозная система – это независимая тормозная система, которая должна удерживать автомобиль в неподвижном состоянии после полной остановки даже при отсутствии водителя в автомобиле. Требования к эффектам торможения и удержания в неподвижном состоянии изложены в RREG 71/320 ECE R13H и §41 сс. 5 и 9. Эффект удержания в неподвижном состоянии вычисляется согласно ECE R13H на уклоне у автомобиля с полной загрузкой. Угол уклона для автомобилей без прицепа составляет 18%. У автомобиля с прицепом эффект удержания в неподвижном состоянии должен достигаться с расторможенным прицепом на уклоне 12%.

Традиционные стояночные тормозные системы являются мускульными и работают чисто механически – это блокируемые ручные и педальные тормоза с кривошипношатунным механизмом. В электромеханических стояночных тормозных системах, также называемых автоматическими стояночными тормозами, управляющее (рабочее) усилие создается электроприводом. Включение и управление осуществляются с помощью электрического выключателя. Электромеханический стояночный тормоз можно включать только при неподвижном состоянии автомобиля или на скорости до 10 км/ч. Это также должно быть возможно при выключенном зажигании и выключателе пуска. Если электрическая стояночная тормозная система задействуется на скорости более 10 км/ч, то сначала выполняется экстренное торможение системой динамической стабилизации.

Прилагаемое усилие зависит от угла уклона, на котором стоит автомобиль. Для этой цели устанавливается датчик угла наклона, в зависимости от системы, в ЭБУ электромеханического стояночного тормоза или системы динамической стабилизации. Подтягивание тормоза, обусловленное охлаждением механических компонентов тормоза, выполняется согласно расчетной температурной модели или после обнаружения движения автомобиля.

Необходимо предусмотреть концепцию безопасности для предотвращения случайной активации системы из-за электрической неисправности или активации системы детьми. Кроме того, намеренная активация (аварийное торможение, необходимое только в случае отказа устройства управления рабочей тормозной системы) электромеханического стояночного тормоза не должна приводить к критическим ситуациям. Если рабочий орган электромеханического стояночного тормоза осознанно задействуется на постоянной основе, то система динамической стабилизации берет на себя функцию торможения автомобиля на скорости выше 10 км/ч. Это обеспечивает оптимально безопасное торможение даже в критических ситуациях. Электромеханический стояночный тормоз активируется только после падения скорости автомобиля ниже определенного порога. Системы сообщаются между собой по каналу связи CAN.

Электрические стояночные тормозные системы могут также включать в себя дополнительные функции, такие как автоматическое торможение (например, при открывании двери) или автоматическое отпускание тормоза при трогании с места.

Электрические стояночные тормозные системы – это системы с дополнительным источником энергии и оснащаются устройством аварийного отпускания. Электрическое управление должно быть реализовано таким образом, чтобы можно было предотвратить случайное торможение во время езды. Кроме того, должна обеспечиваться возможность активации системы даже при выключенном зажигании и пусковом выключателе, и система может быть разблокирована только при включенном зажигании и пусковом выключателе и одновременном нажатии на педаль тормоза.

Самодиагностика выявляет сбои и неисправности и сигнализирует о них с помощью сигнализатора. На информационном дисплее водителя может также появляться текстовое сообщение. Диагностические коды в ЗУ неисправностей можно считать с помощью диагностического тестера и очистить из памяти после устранения неисправностей.

Диагностические тестеры и соответствующее ПО могут потребоваться для работ по обслуживанию, например, при замене тормозных колодок.

Электромеханический стояночный тормоз с серводвигателем на тормозном суппорте

Электромеханический стояночный тормоз с серводвигателем состоит из следующих компонентов (рис. 4, a):

- рабочий блок, ЭБУ, дисплей и сигнализирующие устройства;
- датчик угла наклона (может устанавливаться в системе динамической стабилизации);
- плавающий суппорт с электродвигателем и многоступенчатым приводом.

В случае, когда суппорт оборудуется серводвигателем, сила для создания эффекта стояночного тормоза передается через многоступенчатый редуктор и вал с резьбой. Он активируется электрическим выключателем (рабочий орган), отправляющим команды управления на ЭБУ в соответствии с концепцией безопасности. ЭБУ, с учетом других граничных условий (например, уклона), активирует электрические серводвигатели по проводам через отдельные задающие каскады. Очень высокое передаточное число означает, что можно создать очень большие силы. Эти силы составляют приблизительно 15–20 кН и соответствуют силе, прилагаемой при создании номинального гидравлического давления в гидравлической секции тормоза.

Электромеханический стояночный тормоз с тросами

В случае электромеханического стояночного тормоза с тросами в центрально размещаемый блок – над задней осью, в пассажирском отсеке или в бампере – входят следующие компоненты (рис. 4, b):

- электропривод с редуктором;
- необходимые датчики, в зависимости от объема функций – например, силы, угла наклона, температуры и датчиков положения;
- ЭБУ;
- тросовый механизм, при необходимости с устройством аварийного отпускания.

Эта система также активируется с помощью электрического выключателя, отправляющего управляющие команды на ЭБУ. ЭБУ активирует электрический серводвигатель или серводвигатели через задающий каскад. Прилагаемая сила зависит от угла уклона. Система автоматически подтягивает трос при остановке автомобиля либо после фазы охлаждения в соответствии с температурной моделью, либо после выявления перемещения автомобиля.

Литература

[1] Breuer, B; Bill, K. (редактор): Справочник по тормозам, 3-е издание, Vieweg + Teubner, 2006.

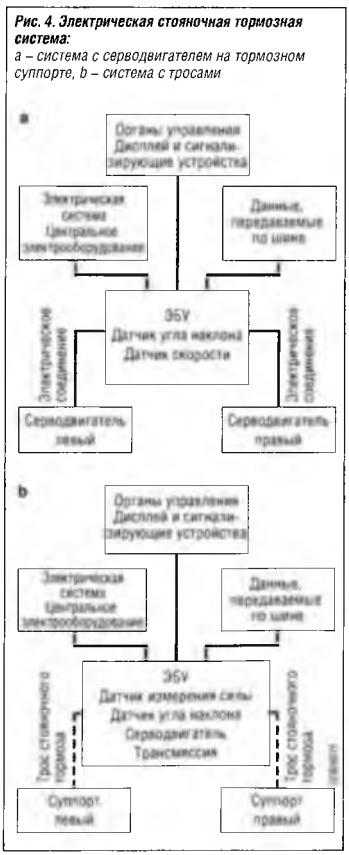


Рис. 4. Электрическая стояночная тормозная система:
a – система с серводвигателем на тормозном суппорте, b – система с тросами

Электрогидравлический тормоз

Назначение и функции

Электрогидравлический тормоз (EHB, его также называют сенсотронным, англ. «Sensotronic Brake Control», SBC) представляет собой тормозную систему, сочетающую в себе функции тормозного сервоблока, ABS (антиблокировочной системы) и ESP (системы динамической стабилизации). Механическое нажатие педали тормоза определяется с помощью электронного датчика хода педали, передающего сигнал на ЭБУ (рис. 1). В ЭБУ по особым алгоритмам вычисляются управляющие команды и передаются на гидравлический модулятор, где они преобразуются в операции модулирования давления для тормозных суппортов. При отказе электроники автоматически включается резервная гидравлическая система.

На основе своих характеристик «торможения по проводам» электрогидравлический тормоз может модулировать давление в тормозных цилиндрах независимо от действий водителя. Это позволяет реализовать функции, выходящие за рамки ABS (антиблокировочной системы), TCS (системы управления тяговым усилием) и ESP (системы динамической стабилизации). Одним из примеров является прямое вмешательство системы ACC (адаптивного круиз-контроля).

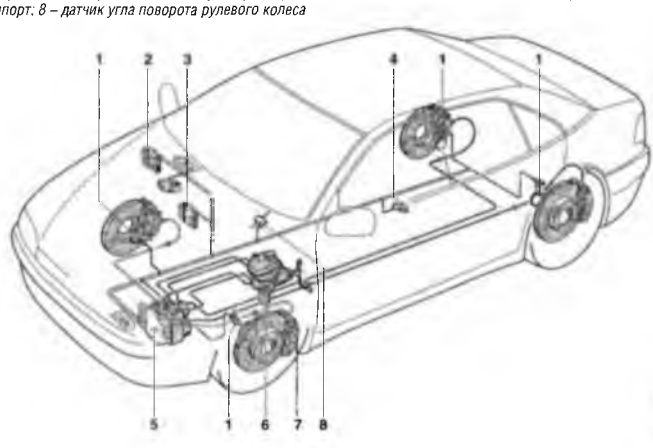
Основные функции

Как и в традиционной тормозной системе, функция электрогидравлической тормозной системы состоит в уменьшении скорости автомобиля, его остановки или сохранения неподвижного состояния. Будучи активной тормозной системой, она управляет работой тормозов и усилением тормозного усилия.

Электрогидравлическая тормозная система – это электронная система управления с гидравлическими актюаторами. Тормозное усилие распределяется электронно отдельно на каждое колесо в зависимости от ситуации. Вакуумный усилитель для тормозной сервофункции больше не требуется. Самодиагностика – функция раннего обнаружения потенциальных сбоев в системе.

В электрогидравлической тормозной системе используются стандартные гидравличе-

Рис. 1. Компоненты электрогидравлического тормоза в автомобиле (монтажное положение):
1 – активный датчик угловой скорости колеса с определением направления вращения; 2 – ЭБУ электроники двигателя; 3 – ЭБУ EHB, 4 – датчик вращения автомобиля вокруг вертикальной оси и датчик бокового ускорения; 5 – гидравлический модулятор; 6 – рабочий блок с датчиком хода педали; 7 – тормозной суппорт; 8 – датчик угла поворота рулевого колеса



ские тормоза колес. Поскольку регулирование давления происходит полностью электронно, то эту систему можно легко интегрировать в сеть систем управления автомобилем. Поэтому она отвечает всем требованиям, предъявляемым к тормозным системам будущего.

С использованием аккумулятора высокого давления электрогидравлическая тормозная система способна крайне быстро повышать давление, создавая потенциал для достижения короткого тормозного пути и превосходной управляемости. Модулирование тормозного давления и активное торможение происходят бесшумно и не генерируют обратной связи на педали тормоза. Следовательно, электронная тормозная система удовлетворяет требованиям к более высокому уровню комфорта.

Характеристики торможения можно адаптировать к ситуации (например, увеличение чувствительности на высокой скорости или при более динамичной езде). Менее чувствительная реакция педали может быть полезна для сигнализирования водителю об уменьшении эффекта торможения, когда тормоза достигают порога эффективности, до того как перегрев начнет вызывать снижение эффективности тормозов.

Дополнительные функции

Дополнительные функции обеспечивают гораздо большую безопасность и удобство при торможении с помощью электрогидравлической тормозной системы.

Система помощи при трогании с места

После активации системы помощи при трогании с места путем определенного увеличения тормозного усилия в неподвижном состоянии автомобиль остается заторможенным даже при отпускании педали тормоза. Система помощи при трогании с места автоматически деактивируется, как только водитель создает достаточный крутящий момент двигателя, нажимая педаль акселератора. Это позволяет водителю трогаться, к примеру, на подъемах, не активируя стояночную тормозную систему. В других ситуациях, где стоящий неподвижно заторможенный автомобиль может покатиться, водителю не нужно постоянно нажимать на педаль тормоза при активированной системе помощи при трогании с места.

Расширенные функции вспомогательных тормозных систем

Если водитель резко отпустит педаль газа, произойдет автоматически регулируемое нагнетание давления, мягко воздействующее на тормозные колодки. При экстренном торможении это позволяет тормозам быстрее «схватиться» и, соответственно, сократить тормозной путь.

Если система определит экстренное торможение, то тормозное давление кратковременно повысится до уровня оптимального коэффициента трения. Это приводит к значительному уменьшению общего тормозного пути у нерешительных водителей. В таких ситуациях быстрое нагнетание давления в электрогидравлической тормозной системе превосходит показатели традиционных систем.

Мягкая остановка

Если установлена система комфортного торможения, то электрогидравлическая тормозная система позволяет останавливаться без рывков за счет автоматического снижения давления непосредственно перед остановкой автомобиля. Если водитель захочет затормозить раньше, эта функция не активируется, и система минимизирует тормозной путь.

Функция помощи в «пробках»

Если активирована функция помощи в «пробках», электрогидравлическая тормозная система генерирует более высокий тормозной момент при отпускании педали газа. Это снимает с водителя необходимость постоянного переключения между педалями газа и тормоза в режиме движения в «пробке». При необходимости автомобиль автоматически затормаживается до остановки и удерживается в неподвижном состоянии. Эту функцию можно активировать лишь при скоростях до 50–60 км/ч.

Функция осушения тормозов

Функция осушения тормозов регулярно удаляет водяную пленку с тормозных дисков в сырую погоду. Это уменьшает общий тормозной путь. Информацию для активации этой функции можно взять, к примеру, из сигнала очистителя лобового стекла.

Конструкция

Система EHB состоит из следующих компонентов (рис. 1):
- рабочий блок;
- датчики динамики автомобиля;
- ЭБУ (т.е. отдельный блок управления);
- гидравлический модулятор с внешним ЭБУ.

Эти компоненты соединяются проводами управления и гидравлическими трубопроводами высокого давления.

Рабочий блок

Рабочий блок состоит из:
- главного тормозного цилиндра с бачком с тормозной жидкостью;
- имитатора хода педали;
- датчика хода педали.

Имитирование хода педали

Имитатор хода педали строит кривую «сила / ход педали» и вычисляет величину смягчения педали тормоза. В результате водитель получает то же «ощущение тормоза» с электрогидравлическими тормозами, как и с очень хорошо сконструированной традиционной тормозной системой.

Система датчиков

Система датчиков электрогидравлической тормозной системы (EHB) состоит из уже известных датчиков системы динамической стабилизации (ESP) и собственно датчиков EHB.

Датчики динамики автомобиля

Система датчиков ESP состоит из четырех датчиков скоростей колес, датчика угла поворота автомобиля вокруг вертикальной оси, датчика угла поворота рулевого колеса и, если применимо, датчика бокового ускорения автомобиля. Эти датчики отправляют на ЭБУ данные о скорости и движении колес и аспектах динамики автомобиля, таких как прохождение поворотов. Функции управления, такие как ABS, TCS и ESP, выполняются уже знакомым образом.

Если автомобиль оснащен адаптивным круиз-контролем (ACC), то система радаров измеряет расстояние до автомобиля, двигающегося спереди. На основании этой информации ЭБУ определяет тормозное давление, нагнетаемое при необходимости, и создает его без обратной связи через педаль тормоза.

Датчики электрогидравлической тормозной системы

На рис. 2 показаны датчики электрогидравлической тормозной системы. Четыре датчика давления измеряют давление в каждом тормозном контуре. Еще один датчик давления измеряет давление в аккумуляторе высокого давления. Сила нажатия на педаль тормоза вычисляется датчиком хода педали, прикрепленным к рабочему блоку, и датчиком давления, определяющим тормозное давление, создаваемое водителем.

Датчик хода педали состоит из двух отдельных датчиков углового положения. Вместе с датчиком тормозного давления, создаваемого водителем, он создает тройную систему для определения действий водителя. Система может продолжить нормально функционировать даже при отказе одного из датчиков.

Принцип действия

Обычный режим

На рис. 2 показаны компоненты электрогидравлического тормоза в виде схемы. Электродвигатель приводит в действие гидравлический насос. Насос нагнетает давление в аккумуляторе высокого давления на уровне 90–130 бар, контролируемое датчиком давления. Четыре отдельных модулятора давления на колесах запитываются от аккумулятора высокого давления и устанавливают необходимое давление отдельно для каждого колеса. Каждый модулятор давления состоит из двух клапанов пропорционального регулирования и датчика давления.

В обычном режиме стопорные клапаны изолируют тормоза от рабочего блока. Система находится в режиме «проводного управления торможением». Она электронно определяет желание водителя затормозить и передает его «по проводам» на модуляторы давления колес. Взаимодействие между двигателем, клапанами и датчиками давления контролируется электронными контурами гибридной технологии в виде внешнего ЭБУ, который имеет два микроконтроллера, контролирующих друг друга. Главной особенностью этой электронной системы является ее расширенная самодиагностика, постоянно контролирующая правдоподобность каждой подсистемы. Это означает, что о любых неисправностях водителю сообщается до возникновения критического состояния. При отказе каких-либо

компонентов система автоматически обеспечивает работу оптимальной оставшейся функции. Большое ЗУ неисправностей позволяет быстро выполнять диагностику и ремонт в случае сбоя.

Интеллектуальный интерфейс с шиной CAN обеспечивает канал связи с ЭБУ сенсорного тормоза SBC. ЭБУ имеет следующие функции:

- электронная программа динамической стабилизации (ESP);
- система управления тяговым усилием (TCS);
- антиблокировочная система (ABS);
- вычисление усилия нажатия педали тормоза;
- дополнительные функции электрогидравлического тормоза (вспомогательные).

Торможение в случае отказа системы

Из соображений безопасности электрогидравлическая тормозная система сконструирована так, что в случае серьезных сбоев (например, сбой электропитания) она переходит в состояние, в котором водитель может затормозить без использования функции активного усиления тормозов. В обесточенном состоянии системы стопорные клапаны создают прямое соединение с рабочим блоком (рис. 2) и таким образом позволяют напрямую гидравлически соединить рабочий блок с тормозными цилиндрами колес.

Для сохранения оптимальной функциональности даже в случае отказа системы плунжеры модуляторов давления служат сепараторами среды между активированным электрогидравлическим и традиционным тормозными контурами передних колес. Они предотвращают попадание газа, который может улетучиваться из аккумулятора высокого давления, в тормозной контур колес, так как это может уменьшить тормозную мощность в случае отказа системы.

Рис. 2. Взаимодействие функциональных модулей электрогидравлического тормоза



Тормозные системы для коммерческих автомобилей

Характеристика системы

Тормозные системы для коммерческих автомобилей и прицепов должны удовлетворять требованиям различных предписаний, например, RREG 71/320 EEC и ECE R13. В них изложены основные функции, эффекты и методы испытаний. Вся тормозная система делится на рабочую, стояночную, запасную и вспомогательную.

Рабочая тормозная система

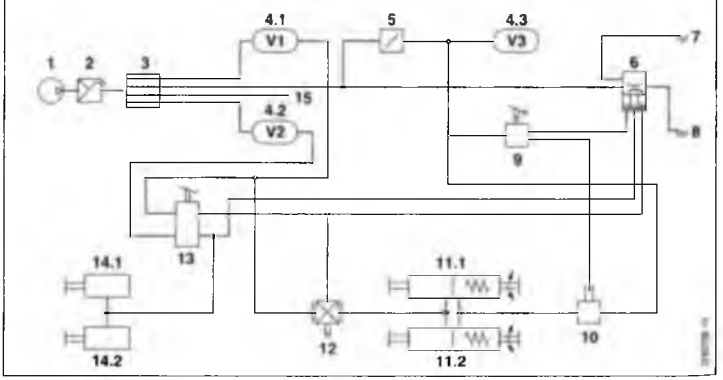
Рабочая тормозная система, тягачи

Рабочая тормозная система, представляющая собой у грузовиков систему с дополнительным источником энергии (рис. 1 и 2), может работать со сжатым воздухом или с сочетанием пневматики и гидравлики.

В случае сбоя, например повреждения тормозного контура, работающая часть системы должна сохранять способность достижения как минимум эффекта запасного торможения – с той же управляющей силой на обычном устройстве управления. Должна обеспечиваться возможность измерения эффекта, и на прицеп не должен влиять этот сбой, т.е. управляющий клапан прицепа должен иметь двухконтурную конструкцию. Эффект запасного торможения должен достигать не менее 50% от эффекта рабочей тормозной системы. Поэтому систему обычно делят на два тормозных контура, уже разделенных на стороне подача, хотя эта конфигурация законодательно предписана только в автобусах.

Подача энергии на прицеп должна гарантироваться даже во время торможения. Двухконтурная система стала обязательной после вступления в силу предписания RREG 71/320, но уже предлагалась и раньше под названием «Nato».

Рис. 1. Структура пневматической тормозной системы с управлением прицепом:
1 – компрессор с приводом от двигателя; 2 – регулятор давления; 3 – четырехконтурный предохранительный клапан, 4.1 – воздушный ресивер V1 для контура 1; 4.2 – воздушный ресивер V2 для контура 2; 4.3 – воздушный ресивер V3 для контура 3 (прицеп; пневматическая подвеска), 5 – перепускной клапан с ограниченным обратным потоком; 6 – клапан управления тормозами прицепа с дросселем; 7 – «питающая» соединительная головка (красная), 8 – «тормозная» соединительная головка (желтая); 9 – клапан стояночного тормоза в положении тестирования; 10 – клапан управления; 11.1 – тормозная камера с энергоаккумулятором, задняя правая, 11.2 – тормозная камера с энергоаккумулятором, задняя левая; 12 – чувствительный к нагрузке регулятор тормозных сил; 13 – кран рабочей тормозной системы; 14.1 – тормозная камера, передняя правая, 14 2 – тормозная камера, передняя левая; 15 – вторичные нагрузки / вспомогательные контуры (пневмоподвеска; система закрывания дверей)



На прицеп по питающему шлангу непрерывно подается сжатый воздух под определенным давлением. Оно должно составлять от 6,5 до 8,0 бар у исправного тягача, независимо от рабочего давления тягача, регламентированного изготовителем. Прицеп должен быть заменяемым. Рабочей тормозной системой прицепа управляет второй трубопровод – тормозной. Этот трубопровод также регламентируется предписаниями, относящимися к заменяемости прицепа. Таким образом, давление в трубопроводе в режиме движения должно составлять 0 бар, а в режиме полного торможения – 6,0–7,5 бар.

Рабочая тормозная система, прицепы

Прицеп имеет независимую рабочую тормозную систему, которая лишь частично требует эффекта запасного торможения. Согласно требованиям RREG 71/320, эффекты торможения рабочей тормозной системы в тягаче и в прицепе должны находиться в узком диапазоне допустимых отклонений как функция управляющего давления в тормозном трубопроводе, идущем к прицепу, т.е. они должны быть примерно одинаковы (расчетный диапазон отклонений RREG 71/320 и ECE R.13).

При повреждении питающей линии или тормозного трубопровода должна обеспечиваться возможность полного или частичного торможения прицепа, либо он должен инициировать автоматическое торможение. У грузовых автомобилей с электронно управляемыми тормозными системами наряду с тормозным пневмопроводом имеется возможность электрического управления рабочей тормозной системой в прицепе. Оно

Рис. 3. Схема совместимости

Тягач и прицеп RREG 71/320, ECE R 13:
T_R – общая сумма тормозных сил на окружности всех колес прицепа;
P_R – общая статическая нормальная сила прицепа;
T_M – общая сумма тормозных сил на окружности всех колес тягача;
P_M – общая статическая нормальная сила тягача,
P_m – давление на «тормозной» соединительной головке

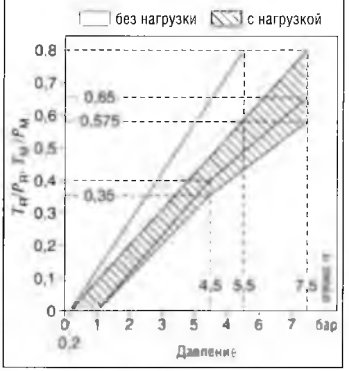
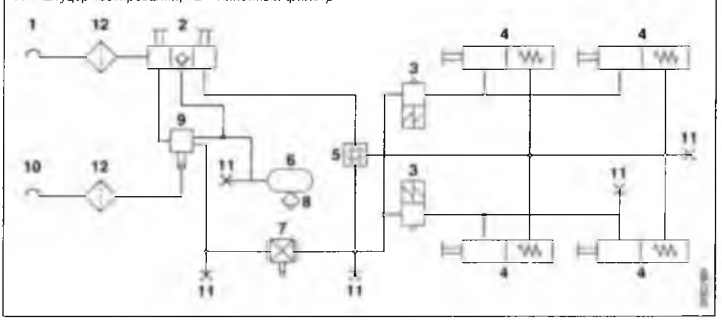


Рис. 2. Пневматическая система 2-осного полуприцепа с ABS (упрощенное представление):

1 – «питающая» соединительная головка (красная); 2 – двойной обратный клапан; 3 – одноканальный клапан регулирования давления ABS; 4 – тормозная система с энергоаккумулятором; 5 – золотниковый клапан; 6 – воздушный ресивер; 7 – чувствительный к нагрузке регулятор тормозных сил; 8 – клапан отвода воды, 9 – клапан тормозной системы прицепа, 10 – «тормозная» соединительная головка (желтая); 11 – штуцер тестирования, 12 – линейный фильтр



осуществляется через стандартизированный электрический разъем ISO 7638; в разъеме может быть 5 или 7 контактов.

Тягачи и прицепы должны быть взаимозаменяемыми. Поэтому в Приложениях 2 RREG 71/320 и ECE R13 определены условия их совместимости. Соответственно, соотношение между замедлением и давлением на «тормозной» соединительной головке в диапазоне, изображенном на рис 3 должно находиться в диапазоне 0,2–7,5 бар на «тормозной» соединительной головке. Эта схема применима только к тягачу и прицепу. Для всех остальных транспортных средств и их сочетаний существуют другие схемы.

Стояночная тормозная система

Стояночная тормозная система – это независимая тормозная система, которая должна удерживать автомобиль в неподвижном состоянии после полной остановки даже при отсутствии водителя в автомобиле. Эффект удержания в неподвижном состоянии вычисляется на уклоне автомобиля с полной загрузкой. Угол уклона для отдельных автомобилей категорий M, N, O (кроме O_1) составляет 18%. У автомобиля с прицепом эффект удержания в неподвижном состоянии должен также достигаться с расторможенным прицепом. В этом случае угол уклона составляет только 12% (рис. 4).

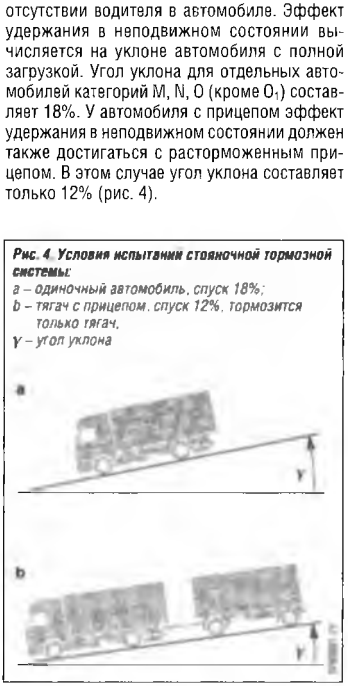


Рис. 4. Условия испытаний стояночной тормозной системы:
a – одиночный автомобиль, спуск 18%;
b – тягач с прицепом, спуск 12%, тормозится только тягач,
γ – угол уклона

Стояночная тормозная система у грузовых автомобилей и автобусов обычно оборудуется тормозными цилиндрами с пружинными энергоаккумуляторами. Пружинные энергоаккумуляторы (когда колесные тормоза регулируются в соответствии с предписаниями) создают такую же силу, что и пневматические тормозные цилиндры в рабочей тормозной системе, когда номинальное давление (расчетное давление в тормозной системе) воздействует на их номинальную эффективную площадь. При возникновении определенных сбоев – например, неисправностей тормозного контура или источника энергии, подпружиненные тормоза не могут гормозить автоматически и поэтому должны быть соответствующим образом защищены и устроены.

Стояночные тормозные системы с тормозными цилиндрами, оборудованными пружинными энергоаккумуляторами, должны оснащаться как минимум одним устройством аварийного отпускания. Это устройство может быть механическим, пневматическим или гидравлическим. Стояночная тормозная система должна быть предназначена только для градуированной (дозированной) работы, если она должна достигать предписанного эффекта запасного торможения.

В прицепе стояночная тормозная система часто работает как система с мускульным источником энергии. Если систему управления прицепом настроить так, чтобы рабочий тормоз в прицепе реагировал также при задействовании стояночного тормоза в тягаче (управляющий клапан прицепа с воздушным ресивером 4.3, см. рис. 1), клапан стояночного тормоза должен иметь тестовую регулировку. Это позволяет отпускать рабочий тормоз прицепа при задействовании стояночного тормоза в тягаче. Это, в свою очередь, позволяет проверить, может ли тягач на одном стояночном тормозе удержать весь автопоезд.

Запасная тормозная система

Независимой запасной тормозной системы не существует. Она задействуется при возникновении неисправности рабочей тормозной системы, например, в тормозном контуре или источнике энергии. В этом случае должна сохраняться возможность торможения как минимум двух колес (на одной оси).

Тормозная система прицепа тоже не должна затрагиваться этими неисправно-

стями. По этой причине тормозные системы и активация прицепа имеют двухконтурную конструкцию.

Объем подачи должен быть рассчитан так, чтобы в случае сбоя в источнике энергии после восьми полных торможений рабочим тормозом давление было бы все еще достаточным для достижения эффекта запасного торможения на девятом полном торможении. В случае сбоя в тормозном контуре на стороне подачи необходимо обеспечить, чтобы при исправном источнике энергии давление в исправных тормозных контурах не падало постоянно ниже номинального. Это достигается путем использования специальных защитных устройств, например четырехконтурного предохранительного клапана или электронного блока.

Вспомогательная тормозная система

Используемые колесные тормоза не предназначены для непрерывного задействования. Длительное торможение (например, на затяжных спусках) может привести к перегреву тормозов. Это приводит к снижению эффекта торможения, а в худшем случае – к полному отказу тормозной системы.

Неизнашиваемой тормозной системой называют вспомогательную тормозную систему (тормоз-замедлитель). В Германии она регламентируется Правилами StVZO § 41 с. 15 для использования в автобусах снаряженной массой более 5,5 т и в других транспортных средствах снаряженной массой более 9 т. Тормоз-замедлитель должен быть рассчитан на удержание полностью загруженного автомобиля при движении по спуску 7% на расстояние 6 км со скоростью 30 км/ч.

Рабочий тормоз должен соответственно рассчитываться и для прицепов. Работа тормоза-замедлителя в тягаче не должна обуславливать задействование рабочего тормоза в прицепе (см. также StVZO § 72 и Ведомости Федерального законодательства 1990 II P. 885, 1102).

Компоненты тормозных систем коммерческих автомобилей

Пневматика

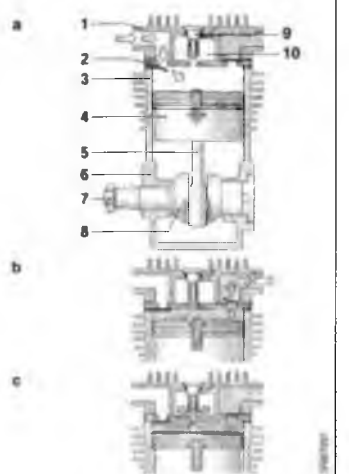
Пневмосистема состоит из источника энергии, регулятора давления, подготовки воздуха и распределения сжатого воздуха.

Компрессор

Компрессор – источник энергии. Он всасывает воздух и сжимает его до состояния рабочей среды для тормозных систем и вспомогательного оборудования (например, пневмоподвески, системы закрывания дверей).

Компрессор представляет собой поршневой насос, в котором коленчатый вал приводится прямо от двигателя автомобиля (рис. 5). Компрессор крепится к ДВС через фланец. Компрессор состоит из следующих компонентов:

Рис. 5. Компрессор:
a – всасывание, b – сжатие и выпуск; c – сжатие в дополнительное пространство; 1 – головка цилиндра; 2 – промежуточная пластина (с впускным и выпускным клапанами); 3 – цилиндр; 4 – поршень, 5 – шатун, 6 – картер; 7 – привод; 8 – коленчатый вал; 9 – клапан ESS; 10 – дополнительное пространство



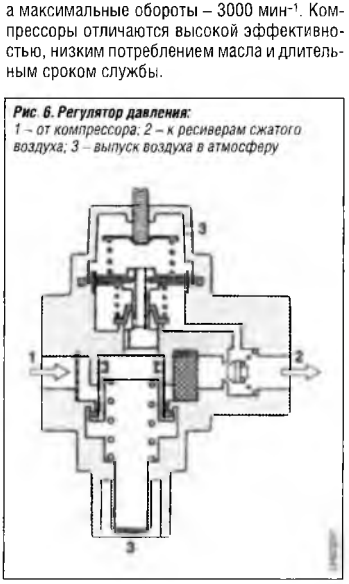
- картер, образующий моноблок с цилиндром; в картере расположен коленчатый вал с шатуном и поршнем;
- головка цилиндра с впускным и выпускным штуцерами, а также штуцеры системы жидкостного охлаждения;
- промежуточная пластина с впускным и выпускным клапанами.

Для уменьшения потерь при создании необходимого давления в пневмосистеме используется система энергосбережения (ESS); она прекращает процесс дальнейшего сжатия воздуха, переводя работу компрессора в режим холостого хода. В результате снижается расход топлива.

Во время возвратного такта поршень всасывает воздух после автоматического открывания впускного клапана из-за образовавшегося вакуума. Впускной клапан закрывается в начале обратного такта поршня. При такте сжатия поршень сжимает воздух. По достижении определенного давления открывается выпускной клапан, и сжатый воздух подается в тормозную систему.

Рабочий объем современных компрессоров достигает 720 куб. см, давление – 12,5 бар, а максимальные обороты – 3000 мин$^{-1}$. Компрессоры отличаются высокой эффективностью, низким потреблением масла и длительным сроком службы.

Рис. 6. Регулятор давления:
1 – от компрессора; 2 – к ресиверам сжатого воздуха; 3 – выпуск воздуха в атмосферу



Регулятор давления

Регулятор давления регулирует подаваемый компрессором сжатый воздух таким образом, чтобы рабочее давление находилось в пределах давления активации и отсечки (рис. 6).

Пока давление в резервуарах сжатого воздуха ниже давления отсечки, штуцеры 1 и 2 соединены, и сжатый воздух проходит через регулятор давления. По достижении давления отсечки регулятор давления переключается в холостой режим. В этом случае активируется выпускной поршень, и штуцер 1 соединяется с атмосферой (выпуск).

Воздухоосушитель

Воздухоосушитель очищает и осушает сжатый воздух во избежание коррозии и замерзания в тормозной системе в зимний период.

Воздухоосушитель состоит из осушительной коробки и корпуса с выпускным воздушным клапаном и устройством для восстановления гранул (рис. 7). Гранулят восстанавливается путем активации в восстановительном ресивере.

Когда выпускной воздушный клапан закрыт, то сжатый воздух протекает через осушительную коробку и оттуда проходит в питающий ресивер. В то же время ресивер регенерации заполняется сухим сжатым воздухом. По мере прохождения сжатого воздуха через осушительную коробку влага удаляется путем конденсации и впитывания.

Гранулированный состав в осушающей коробке обладает ограниченной водопоглощающей способностью и поэтому должен регенерироваться через регулярные интервалы. В процессе регенерации сухой сжатый воздух из ресивера регенерации через регенерирующий дроссель проходит сквозь влажный гранулированный состав, извлекая из него влагу, и через открытый выпускной клапан возвращается в атмосферу.

Регулятор давления и воздухоосушитель можно скомбинировать в один блок.

Четырехконтурный предохранительный клапан

Четырехконтурный предохранительный клапан распределяет сжатый воздух по различным тормозным и вспомогательным контурам, изолирует контуры друг от друга и обеспечивает подачу воздуха в оставшиеся контуры при неполадках в одном из контуров (рис. 8).

Функция четырехконтурного предохранительного клапана обеспечивается с помощью перепускных клапанов, специально разрабо-

танных для этой области применения. В отличие от обычного перепускного клапана этот перепускной клапан имеет две разных зоны действия на приточной стороне. Давление, поступающее с регулятора давления, воздействует на одну зону, а давление из контура пневматики – на другую. Таким образом, давление открывания перепускных клапанов зависит от давления (остаточного) в соответствующем контуре пневматики.

Перепускные клапаны могут располагаться по-разному. Зачастую контуры 1 и 2 и вспомогательные контуры 3 и 4 последовательно соединяются парами. Это гарантирует, что как минимум один из двух контуров рабочей тормозной системы заполняется в порядке приоритетности. Вспомогательные контуры для клапанов этого типа дополнительно защищаются двумя невозвратными клапанами. Их можно не устанавливать в случае с четырехконтурными защитными клапанами с центральным притоком. Эти перепускные клапаны могут также оснащаться ограничителями переменного потока. Они позволяют заполнять пустую систему небольшими объемами воздуха.

При возникновении сбоя, например, в контуре 1 (из-за течи), давление сначала падает только в контуре 1 до 0 бар, а в контуре 2 до давления закрытия. Давление в контурах 3 и 4 изначально поддерживается за счет невозвратных клапанов, но падает до давления закрытия из-за расходования воздуха. Воз-

Рис. 7. Воздухоосушитель со встроенным регулятором давления:
1 – осушительная коробка; 2 – компрессионная пружина; 3 – осушитель; 4 – чашка (регулирующий клапан); 5 – компрессионная пружина; 6 – палец; 7 – диафрагма; 8 – компрессионная пружина; 9 – нагревательный элемент; 10 – стравливающий клапан; 11 – сливной штуцер; 12 – дроссель; 13 – невозвратный клапан; 14 – предварительный фильтр, 15 – вторичный фильтр
Разъемы:
1 – от компрессора; 21 – к питающему ресиверу; 22 – к ресиверу регенерации; 3 – выпускное отверстие

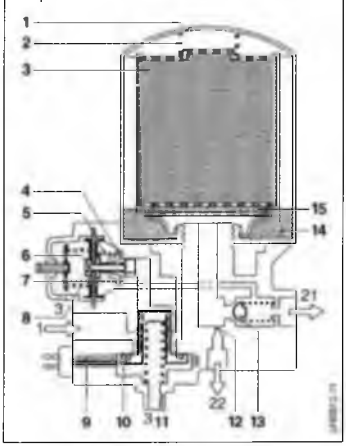
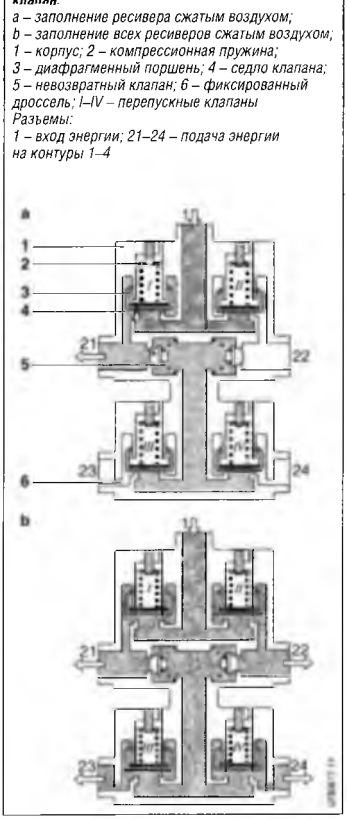


Рис. 8 Четырехконтурный предохранительный клапан:
a – заполнение ресивера сжатым воздухом;
b – заполнение всех ресиверов сжатым воздухом;
1 – корпус; 2 – компрессионная пружина;
3 – диафрагменный поршень; 4 – седло клапана;
5 – невозвратный клапан; 6 – фиксированный дроссель; I–IV – перепускные клапаны
Разъемы:
1 – вход энергии; 21–24 – подача энергии на контуры 1–4



дух продолжает нагнетаться компрессором в исправные контуры, так как остаточное давление в контурах 2, 3 и 4 воздействует на вторичную зону соответствующих перепускных клапанов. Исправные контуры снова заполняются, до тех пор пока давление открывания неисправного контура (1-го контура) не начнет воздействовать на первичную зону соответствующего перепускного клапана, открывая его. Дальнейший рост давления невозможен, потому что, начиная с этого момента, подаваемый сжатый воздух улетучивается через неисправный контур. Давление открывания через первичную зону действия регулируется таким образом, чтобы оно было больше либо равно номинальному (расчетному) давлению тормозной системы. Это обеспечивает и достаточную подачу сжатого воздуха в исправный контур рабочей тормозной системы, и эффект вторичного торможения. Также поддерживается подача сжатого воздуха во вспомогательные контуры – прицепа, стояночной тормозной системы и пневмоподвески.

Электронный блок обработки воздуха

Сегодня регулировка давления, подготовка воздуха и распределение сжатого воздуха сочетаются в одном электронном блоке – блоке обработки воздуха. Электронный блок обработки воздуха (EAC, Electronic Air Control) – это функциональное объединение регулятора давления, воздухоосушителя и многоконтурного предохранительного клапана в одном мехатронном устройстве. Это дает значительные преимущества в плане затрат на систему, функциональности и энергосбережения.

Аккумулирование энергии

Энергия, необходимая для торможения и для работы вспомогательных контуров, накапливается и хранится в достаточных количествах в ресиверах сжатого воздуха, допущенных к эксплуатации в автомобилях. Объем должен рассчитываться так, чтобы, без последующей подачи, после восьми последующих торможений все еще достигался предписанный для этого автомобиля эффект вторичного торможения, как минимум на девятом полном торможении. Несмотря на использование воздухоосушителя, ресиверы со сжатым воздухом оснащаются ручными или автоматическими дренажными устройствами. Ресиверы со сжатым воздухом должны выполнять требования §41а с. 8 в увязке с §72 StVZO, и должны получать допуск к эксплуатации и иметь идентификационное обозначение.

Системы подачи для тормозных систем должны оснащаться сигнальными устройствами. При этом предъявляются следующие требования:

- красная сигнальная лампа;
- всегда видна водителю;
- загорается не позднее, чем при задействовании тормоза или падении давления на входе рабочей тормозной системы до 65% от номинального. Для стояночной тормозной системы (подпружиненного тормоза) этот показатель составляет 80% от номинального давления.

Тормозной кран рабочей системы

Клапаны рабочего тормоза (рис. 9) имеют двухконтурную конструкцию и регулируют контуры рабочего тормоза соответственно управляющему усилию (клапаны, управляемые усилием).

Контур 1 активируется устройством управления, шатуном и компрессионными пружинами (пружинами компенсации хода). Управляющий поршень идет вниз, сначала закрывая выпускной клапан и затем открывая впускной. Сжатый воздух попадает в тормозной контур 1, и давление повышается. Тормозное давление воздействует на управляющий поршень в направлении вверх, упирая его в компрессионные пружины до выхода за границы диапазона торможения. Крайнее положение тормоза достигается при равновесии сил, воздействующих на управляющий поршень.

Контур 2 регулируется тормозным давлением в контуре 1. Он, вместо устройства управления сверху, воздействует на реактивный поршень контура 2. Приблизительно в то же время в контуре 2 тоже достигается крайнее положение тормоза. В положении полного торможения или в случае сбоя в контуре 1 оба управляющих поршня механически перемещаются в полностью вытянутое положение с помощью устройства управления. Выпускные клапаны закрываются, а впускные остаются открытыми. Контуры 1 и 2 пневматически полностью и безопасно изолированы друг от друга. Особые конструкции обеспечивают разные контролируемые давления торможения для контуров 1 и 2. Они требуются, если клапаном рабочего тормоза активируется двухконтурный усиливающий цилиндр, или если управление контуром 2 зависит от нагрузки. Это становится возможным путем установки соответ-

ствующей пружины или реактивного поршня с несколькими зонами действия.

Тормозной кран стояночной системы

Краны стояночного тормоза (рис. 10) регулируют давление в тормозных цилиндрах с пружинными энергоаккумуляторами в зависимости от положения рычага. Рычаг должен надежно фиксироваться в положении «тормоз включен». Краны стояночного тормоза предназначены только для градуированной (дозированной) работы, если он должен достигать эффекта запасного торможения. Краны стояночного тормоза должны быть снабжены испытательной регулировкой, когда в прицепе после активации стояночного тормоза приводится в действие рабочая тормозная система.

Существуют различные варианты кранов стояночного тормоза, в зависимости от области применения: неградуированные, градуированные или градуированные с крутой характеристической кривой. Последний вариант обеспечивает очень чувствительный градуируемый эффект, так как рабочий диапазон тормозных цилиндров с пружинными энергоаккумуляторами, при угле рычага крана стояночного тормоза около 80°, используется оптимально. Рабочий диапазон тормозных цилиндров с пружинными энергоаккумуляторами находится в пределах от 5 бар (начало торможения) до примерно 2 бар (конец торможения, см. схемы на рис. 11).

В пневматических тормозных системах высокого давления (рабочее давление более 10 бар) кран стояночного тормоза может оснащаться ограничителем давления, чтобы можно было использовать стандартные тормозные цилиндры с пружинными энергоаккумуляторами. Устройство в кранах стояночного тормоза для получения возможности измерения регулируемого давления схоже с устройством в кранах рабочего тормоза, но работает в обратном направлении, потому что тормозные цилиндры с пружинными энергоаккумуляторами вентилируются в режиме движения и режим включенного тормоза достигается путем стравливания воздуха.

Рис. 9. Тормозной кран рабочей системы:
1 – поршень толкателя; 2 и 3 – компрессионные пружины; 4 – управляющий поршень, 5 и 9 – седло впускного клапана; 6 и 8 – седло выпускного клапана; 7 и 10 – пластины клапанов; 11 – пружины клапанов; 12 – возвратная пружина; 13 – регулирующий плунжер; 14 – седло пружины, 15 – соединительная тяга

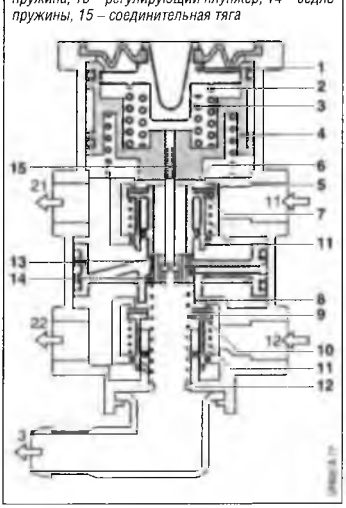
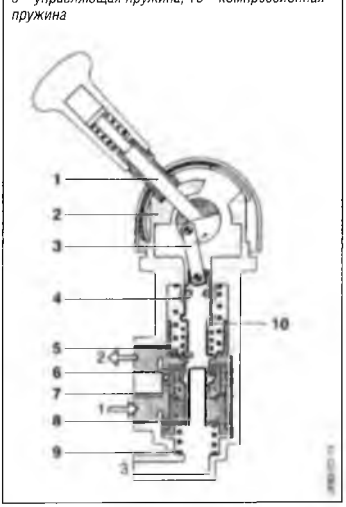


Рис. 10. Тормозной кран стояночной системы (режим движения):
1 – рычаг активации системы; 2 – фиксатор; 3 – эксцентрик; 4 – возвратная пружина; 5 – седло выпускного клапана; 6 – седло впускного клапана; 7 – пластина клапана; 8 – управляющий поршень; 9 – управляющая пружина, 10 – компрессионная пружина



Краны стояночного тормоза могут иметь двухконтурную конструкцию. В этом случае система запитывается из контура 3, а пневматическое вспомогательное отпускающее устройство пружинных актюаторов – из контура 4. В этом случае можно отказаться от дополнительной поворотной ручки-кнопки, золотникового или обратного клапана.

В варианте с крутой характеристической кривой (рис. 11), начало торможения достигается раньше, и диапазон активации значительно шире. Это имеет преимущества, в частности, при использовании стояночного тормоза в качестве запасного тормоза.

Автоматический регулятор тормозной силы, чувствительный к нагрузке

Система автоматической регулировки тормозного усилия в зависимости от нагрузки (ALB) – необходимый элемент в передающем устройстве рабочей тормозной системы в грузовом автомобиле. Клапаны, отвечающие за распределение тормозных сил, позволяют регулировать тормозные силы под небольшие нагрузки на оси в частично загруженном и незагруженном состоянии и, соответственно, устанавливать коррекцию распределения тормозных сил между осями отдельных т/с или определенный уровень торможения в автопоездах и полуприцепах.

Автоматический регулятор тормозной силы (рис. 12) подключается между краном рабочего тормоза и тормозным цилиндром. В зависимости от нагрузочного режима автомобиля с помощью регулятора изменяется тормозное давление. Устройство имеет диафрагму с переменной активной площадью. Диафрагма регулятора опирается на два радиально расположенных и свободно входящих друг в друга скоса. В зависимости от положения седла клапана управления в вертикальном направлении имеется большая активная площадь (положение клапана внизу) или меньшая (положение клапана вверху). Тормозные цилиндры снабжаются воздухом через ускорительный

Рис. 11. Характеристика давления (диапазон активации):
a – нормально градуированный кран стояночного тормоза, b – градуированный кран стояночного тормоза с крутой характеристической кривой; 1 – характеристика давления; a – свободный ход (подъем клапана); b – диапазон активации; c – начало торможения; d – конец торможения

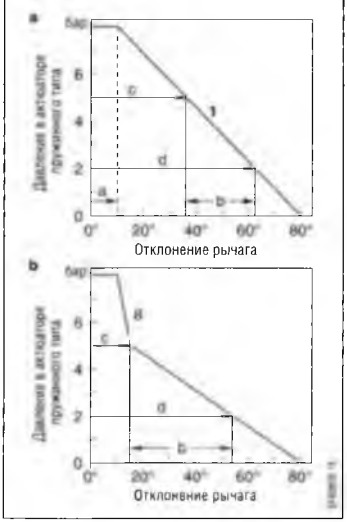
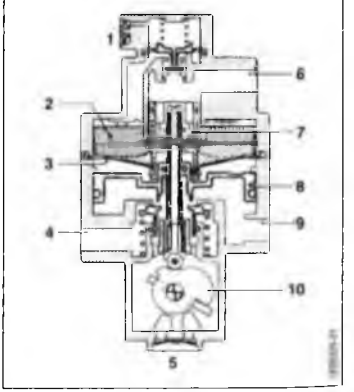


Рис. 12. Автоматический регулятор тормозной силы с клапаном
1 – выпуск; 2 – скос, 3 – диафрагма; 4 – от ресивера со сжатым воздухом; 5 – выпуск в атмосферу; 6 – неконтролируемое давление из клапана рабочего тормоза; 7 – клапан управления; 8 – ускорительный поршень; 9 – регулируемое тормозное давление к тормозным цилиндрам; 10 – поворотный кулачок



клапан, давление после которого несколько меньше (ненагруженное состояние), чем от крана рабочей системы, или является таким же (полностью загруженное состояние). Регулирующий кран можно перевести в положение, чувствительное к нагрузке с помощью эксцентрика, присоединяемого через систему рычагов к оси автомобиля или с помощью клина (у автомобилей с пневматической подвеской).

Ограничитель давления, который расположен в верхней части регулятора, пропускает небольшой поток воздуха ограниченного давления (примерно 0,5 бар) в полость над диафрагмой. Таким образом, до образования этого давления не происходит какого-либо уменьшения давления в тормозном цилиндре. Это необходимо для синхронного включения тормозов на всех осях автомобиля.

Комбинированный тормозной цилиндр

Комбинированный цилиндр в грузовом автомобиле состоит из диафрагменного рабочего цилиндра и пружинного актюатора стояночного тормоза (рис. 13). Эти детали располагаются одна за другой и воздействуют с определенной силой на объединенный шток.

Рис. 13. Комбинированный тормозной цилиндр дискового тормоза (режим движения).
1 – толкатель; 2 – шток; 3 – сильфоны с уплотнительными манжетами; 4 – компрессионная пружина (диафрагменный цилиндр); 5 – поршень (диафрагменный цилиндр); 6 – крепежные болты; 7 – диафрагма; 8 – промежуточный фланец; 9 – корпус цилиндра (пружинный тормозной актюатор); 10 – поршень (пружинный тормозной актюатор); 11 – стравливающий клапан (камера пружинного тормозного актюатора); 12 – компрессионная пружина (пружинный тормозной актюатор); 13 – отпускающий винт (пружинный тормозной актюатор) Воздушные каналы: 11 – рабочий тормоз; 12 – стояночный тормоз



Различают комбинированные цилиндры для тормозов с S-образным кулачком, барабанных тормозов с клиновым разжимным устройством и дисковых тормозов в зависимости от типа колесного тормоза.

Два цилиндра могут активироваться независимо друг от друга. Одновременное срабатывание обеспечивает суммирование сил. Этого можно избежать путем установки специального клапана управления, чтобы автоматически предотвращалась механическая перегрузка других компонентов (например, тормозных барабанов).

Центральный отпускающий винт позволяет подтягивать пружину актюатора без подачи сжатого воздуха (механическое устройство аварийной разблокировки). Это необходимо для упрощения установки или, в случае сбоя подачи сжатого воздуха, получения возможности для маневрирования автомобиля.

При задействовании рабочего тормоза сжатый воздух попадает под диафрагму в цилиндр и прижимает плунжерный диск и толкатель к рычагу дискового тормоза. Сброс давления ведет снова к отключению тормозного механизма.

Когда сжатый воздух попадает в пружинный актюатор, поршень сжимает пружины, отпуская тормоз. Если камера вентилируется, то пружинный актюатор через шток воздействует на диафрагменную часть и вдавливает толкатель в механизм дискового тормоза через диск поршня.

Клапан управления тормозами прицепа

Клапан управления тормозами прицепа, установленный на тягаче, управляет рабочим тормозом прицепа. Этот многоконтурный клапан управления запитывается через магистрали как рабочей, так и стояночной тормозных систем (рис. 14). В режиме движения питающая камера III и камера IV контура стояночного тормоза находятся под одинаковым давлением. Тормозной трубопровод, идущий к прицепу, соединяется с атмосферой через центральное выпускное отверстие (3). Рост давления в камере I тормозного контура 1 и в камере V тормозного контура 2 ведет к соответствующему повышению давления в камере II тормозного трубопровода, идущего к прицепу. Уменьшение давления в обоих контурах рабочей системы приводит к такому же уменьшению давления в тормозном трубопроводе. Работа стояночной тормозной системы приводит к выпуску воздуха из контура стояночного тормоза (камера IV). В результате растет давление в камере II тормозного

трубопровода, идущего к прицепу. Когда воздух попадает в камеру IV, из трубопровода снова выпускается воздух.

Если снять тормозной трубопровод, идущий к прицепу, то давление в питающем трубопроводе к прицепу должно упасть до уровня 1,5 бар менее чем за две секунды (предписывается Правилами RREG 71/320). Для этого подача сжатого воздуха в питающий трубопровод ограничивается с помощью встроенного клапана.

Тормозная система с электронным управлением

Требования и функции

С дальнейшим развитием двухконтурной пневматической тормозной системы в середине 90-х появилась тормозная система с электронным управлением (EBS). Модульная конструкция позволяет охватить различные типы автомобилей лишь с небольшим количеством компонентов. Особенности автомобилей и различные факторы можно в значительной степени учесть путем соответствующего программирования центрального ЭБУ. Схема управления определяется количеством осей и их расположением, а также необходимым объемом функций, и варьируется от 4S/4M до 8S/6M (S – датчик угловой скорости колес, M – модуль регулирования давления).

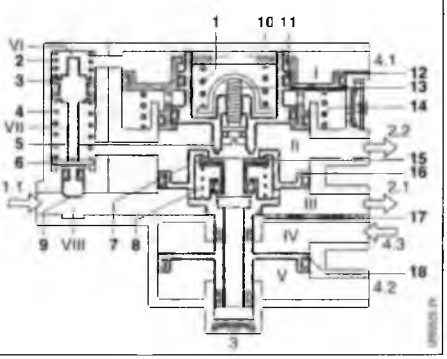
Конструкция и принцип действия

Тормозная система с электронным управлением (рис. 15), как и традиционные пневматические тормоза с антиблокировочной системой (ABS), состоит из системы подачи сжатого воздуха, только функции регулятора давления, воздухоосушителя и многоконтурного предохранительного клапана могут быть скомбинированы в одном электронном блоке (EAC,

Рис. 14. Клапан управления тормозами прицепа с функцией расцепления (режим движения):
1 и 2 – компрессионная пружина; 3 – управляющий плунжер, 4 – пружина в сборе; 5 – седло выпускного клапана; 6 – диск; 7 – седло впускного клапана; 8 – компрессионная пружина, 9 – дроссель; 10 – корпус; 11 и 12 – управляющий плунжер; 13 – регулирующий винт; 14 – компрессионная пружина; 15 – диск клапана; 16 – управляющий поршень; 17 – втулка; 18 – управляющий плунжер

I–VIII – камеры

Разъемы.
1.1 – вход из контура 3;
2.1 – подача сжатого воздуха на «питающую» соединительную головку (красную);
2.2 – подача сжатого воздуха на «тормозную» соединительную головку (желтую);
4 1 – управляющий разъем нерегулируемый напорный контур 1;
4.1 – управляющий разъем нерегулируемый напорный контур 2;
4 3 – управляющий разъем стояночный тормоз;
3 – центральное выпускное отверстие



Electronic Air Control). Таким образом, можно лучше адаптировать определенные функции – такие как, например, последовательности заполнения или восстановление – к требуемым условиям и гарантировать даже больший уровень функциональной надежности.

В электронной тормозной системе энергия тоже аккумулируется в ресиверах сжатого воздуха, и оттуда подается на модули регулировки давления и на клапан рабочего тормоза. Клапан рабочего тормоза состоит из электрического датчика хода педали и пневматической секции, функционально идентичной прежнему варианту по конструкции. Датчик хода педали, состоящий из двух резервных потенциометров, отклоняемых с помощью устройства управления, отправляет на центральный ЭБУ два вида сигналов противоположного напряжения. В свою очередь, ЭБУ активирует модули регулирования давления на передней и задней осях, чтобы необходимое тормозное давление направлялось в тормозные цилиндры, находящиеся за модулями регулирования давления. Это тормозное давление контролируется встроенными датчиками давления модулей регулирования давления. В то же время имеется обратная связь тормозного давления с пневматической секцией клапана рабочего тормоза для передачи интенсивности торможения.

Модули регулирования давления могут быть одноконтурными или двухконтурными. Если автомобиль рассчитан на движение с прицепом, то в качестве замены для регулирующего клапана прицепа предусматривается модуль управления прицепом. Этот модуль управления прицепом так же активируется центральным ЭБУ при торможении и обеспечивает адаптированное управляющее давление на «тормозной» соединительной головке (желтой). Это позволяет двигаться с прицепом, имеющим традиционные тормоза. Если автомобиль движется с прицепом, имеющим независимую электронную тормозную систему, то управление осуществляется через электрический разъем ISO 7638 (ABS-разъем). Тем не менее, прицеп должен быть соединен и пневматически, потому что это единственный способ подачи на прицеп давления и пневматического управления им в случае сбоя в электронной системе. Управляя электронной тормозной системой в прицепе, можно обеспечить оптимальное соотношение по эффективности торможения между тягачом и прицепом. Одновременное, совпадающее по параметрам торможение обеспечивает оптимальное соотношение сцепления шин с дорогой и тормозных сил.

Другие функции, такие как антиблокировочная система (ABS), система управления



Рис. 15. Рабочая тормозная система тормозной системы с электронным управлением:
a – тягач; b – прицеп; 1 – четырехконтурный предохранительный клапан; 2 – ресивер со сжатым воздухом, 3 –клапан рабочего тормоза с датчиком уровня торможения; 4 – одноканальный модуль регулировки давления; 5 – тормозной цилиндр; 6 – датчик угловой скорости колеса; 7 – датчик износа колодок; 8 – ЭБУ EBS в тягаче; 9 – двухканальный модуль регулировки давления; 10 – датчик давления; 11 – баллоны пневморессоры; 12 – клапан управления тормозами прицепа; 13 – «питающая» соединительная головка (красная); 14 – «тормозная» соединительная головка (желтая), 15 – разъем ISO 7638 (7-контактный); 16 – линейный фильтр; 17 – тормозной клапан прицепа с отпускающим винтом; 18 – ЭБУ EBS прицепа

тяговым усилием (TCS) и система динамической стабилизации (ESP), входят в объем функций электронной тормозной системы. Вращение колес контролируется датчиками угловой скорости колес и антиблокировочной системой. В зависимости от конструкции, информация передается на центральный ЭБУ или модуль регулирования давления, где обрабатывается. В случае начинающейся блокировки колес, в зависимости от конфигурации и конструкции системы, выполняется управляющее вмешательство системы посредством модулей регулировки давления или расположенных далее клапанов регулирования давления, в соответствии с вариантами управления, известными системе ABS (индивидуальное регулирование, измененное индивидуальное регулирование или регулирование с выбором малой нагрузки). Вмешательство системы управления тяговым усилием во время вращения колес происходит в виде изменения крутящего момента двигателя и подтормаживания колес. Остальные датчики требуются для функций системы динамической стабилизации. Это датчик угла поворота рулевого колеса, датчик скорости вращения автомобиля вокруг вертикальной оси и датчик поперечного ускорения. После анализа данных определяется отклонение от курса или складывание автопоезда, и выполняется стабилизация посредством создания определенного тормозного давления на соответствующих тормозных цилиндрах и вмешательства других систем.

При возникновении сбоя в электрике, автомобиль можно затормозить с помощью одного или двух резервных пневматических контуров как минимум с требуемым эффектом запасного торможения и с управляемой тормозной системой прицепа.

Оптимальное взаимодействие между всеми системами может быть достигнуто путем обмена данными с другими системами в автомобиле и прицепе. Таким образом, могут быть реализованы оптимизированные процессы замедления и ускорения и дополнительные функции.

Преимущества применения электронных тормозных систем на грузовом автомобиле:

- быстрое и одновременное нагнетание давления во всех тормозных цилиндрах;
- хорошее выполнение измерений, соответственно, оптимальный комфорт торможения;
- оптимальное взаимодействие между тягачом и прицепом за счет управления силами сцепления;
- точное распределение тормозных сил;
- равномерный износ фрикционных накладок;
- интеграция функций ABS, TCS и ESP (взаимодействие тормозов и двигателя), легко реализуемое управление тягой для внедорожных условий;
- управление динамикой движения через взаимодействие двигателя и тормозов при обнаружении избыточной или недостаточной поворачиваемости, в ответ на риск отклонения от курса (автопоезда, сочлененные автобусы), и взаимодействие в ответ на риск опрокидывания;
- простота обслуживания благодаря расширенным функциям диагностики.

Компоненты электронной тормозной системы

Электронный блок управления

Центр управления электронной тормозной системы состоит из одного или нескольких ЭБУ. В настоящее время существуют системы с централизованной структурой (т.е. все программные функции выполняются в одном ЭБУ) и системы с децентрализованной конфигурацией – с несколькими ЭБУ.

Тормозной кран рабочей системы

Клапан рабочего тормоза у электронной тормозной системы по конструкции схож с традиционными, чисто пневматическими клапанами рабочего тормоза. Однако в клапане рабочего тормоза также занесены электронные номинальные значения для регулировки тормозного давления (рис. 16). Таким образом, он выполняет две функции. Два резервных датчика (например, потенциометры) определяют желание водителя затормозить путем измерения длины хода толкателя клапана. Измеренное значение резервно передается на центральный ЭБУ, где преобразуется в запрос на торможение. Точно таким же образом, как и в случае с традиционным клапаном рабочего тормоза, подается пневматическое регулирующее давление, соответствующее длине хода исполнительного органа. Это регулирующее давление требуется для резервного управления в случае сбоя.

Модули регулирования давления

Модули регулирования давления (рис. 17) являются интерфейсом между электронной тормозной системой и пневматически активируемыми колесными тормозами. Модули преобразуют необходимые значения тормозного давления, передаваемые по шине CAN, в пневматическое давление. Преобразование выполняется пропорциональными электромагнитными клапанами или комбинацией впускных/выпускных электромагнитных клапанов. Датчик давления измеряет создаваемое давление. Таким образом, тормозное давление можно контролировать в замкнутом управляющем контуре. Электрически активируемый резервный клапан отсекает пневматическое регулирующее давление клапана рабочего тормоза, чтобы обеспечить электрическое регулирование давления без внешних вмешательств.

Монтаж модулей регулирования давления выполняется рядом с колесами, для того чтобы электрические провода для подключения датчиков угловых скоростей колес и датчиков износа колодок были короткими. Информация подготавливается в модуле регулирования давления и передается по шине CAN на центральный ЭБУ. Это уменьшает затраты на проводку в автомобиле.

Модуль управления тормозами прицепа

Электронный модуль управления тормозами прицепа позволяет изменять регулирующее давление прицепа согласно функциональным требованиям электронной тормозной системы. Пределы диапазонов электрического управления определяются требованиями законодательства. Электронно задаваемое номинальное значение преобразуется в физическое тормозное давление посредством примерно такого же расположения электромагнитного клапана, как и в модуле регулировки давления. Резервное давление отсекается либо резервным электромагнитным клапаном, либо путем пневматического удержания, в зависимости от конструкции.

При обычных условиях модуль управления прицепом должен активироваться двумя независимыми управляющими сигналами. Это могут быть два пневматических сигнала из двух управляющих контуров, либо один пневматический и один электрический управляющие сигналы.

***Рис. 16.** Клапан рабочего тормоза с двумя пневматическими управляющими контурами:*
1 – датчик уровня торможения;
2 – клапан рабочего тормоза;
3 – питающий разъем;
4 – разъем для потенциометра;
5 – соединение с массой

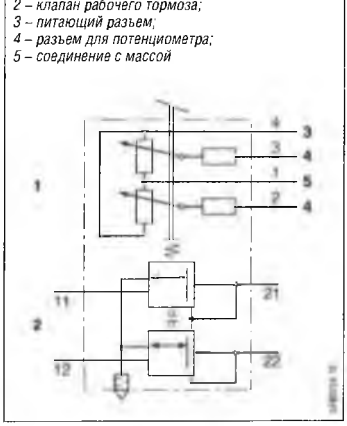
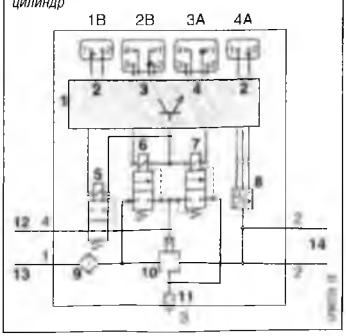


***Рис. 17** Одноканальный модуль регулирования давления:*
1 – ЭБУ; 2 – датчик скорости; 3 – датчик износа колодок; 4 – CAN; 5 – резервный клапан;
6 – впускной клапан; 7 – выпускной клапан;
8 – датчик давления; 9 – фильтр; 10 – управляющий клапан, 11 – звукопоглощающее устройство;
12 – резервный контур; 13 – подача, 14 – тормозной цилиндр



Вспомогательные тормозные системы

В грузовых автомобилях используется главным образом два типа вспомогательных тормозных систем – по отдельности либо в комбинированном виде: торможение двигателем за счет дросселирования выхлопа и тормоз-замедлитель.

Система с торможением двигателем

Сопротивление, которое двигатель оказывает скорости, задаваемой извне без подачи топлива, называется торможением двигателем за счет дросселирования выхлопа. Торможение двигателем у стандартных двигателей составляет 5–7 кВт на литр рабочего объема. Требования, изложенные в §41, с. 15 не могут соблюдаться с чисто горным тормозом. Для повышения эффекта торможения двигателем можно использовать дополнительные меры.

Моторный тормоз с выпускной заслонкой

В моторном тормозе с выпускной заслонкой имеется клапан с заслонкой, закрывающей тракт выпуска отработавших газов. Одновременно перекрывается подача топлива. В результате в системе выпуска отработавших газов образуется противодавление, которое должно преодолеваться каждым поршнем во время такта выпуска (рис. 1). Мощность торможения можно регулировать с помощью клапана регулирования давления в тракте выпуска ОГ. Кроме того, этот клапан предотвращает повреждение механизма из-за чрезмерного давления на высоких оборотах.

Моторный тормоз с выпускной заслонкой – самый популярный вариант, используемый в грузовиках и автобусах, обеспечивающий мощность торможения 14–20 кВт на литр рабочего объема двигателя.

Моторный тормоз с постоянным дросселем

Моторный тормоз с постоянным дросселем называют также декомпрессионным тормозом. В этом случае работа, выполняемая двигателем в такте сжатия, не используется. Выпускные клапаны или дополнительный клапан (постоянный дроссель, рис. 2) определенным образом открываются в конце такта сжатия, уменьшая давление, созданное в такте сжатия. Таким образом, в такте расширения на коленвал не передается дополнительная работа.

Моторный тормоз с заслонкой и постоянным дросселем

Мощность торможения можно дополнительно повысить, скомбинировав заслонку с постоянным дросселем (рис. 2). Эта комбинация может обеспечить мощность торможения 30–40 кВт на литр рабочего объема.

Тормоз-замедлитель

Тормоза-замедлители – это неизнашиваемые тормоза непрерывного действия. Существует

Рис. 1. Моторный тормоз с заслонкой и дополнительным клапаном регулирования давления:
1 – активация выпускной заслонки (сжатый воздух), 2 – выпускная заслонка, 3 – байпас, 4 – клапан регулирования давления, 5 – выпуск; 6 – впуск, 7 – поршень (4-й такт)

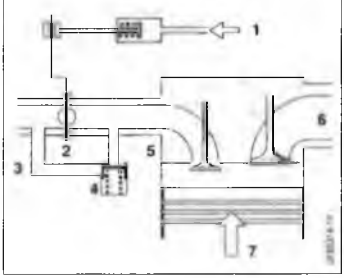
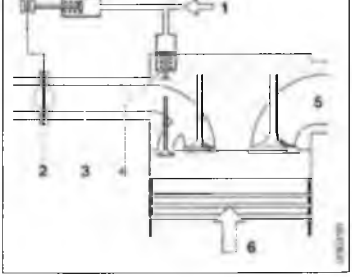


Рис. 2. Моторный тормоз с заслонкой и постоянным дросселем:
1 – сжатый воздух 2 – выпускная заслонка; 3 – выпуск. 4 – постоянный дроссель; 5 – впуск; 6 – поршень (2-й такт)



два типа тормозов-замедлителей, различающихся принципом работы: гидродинамические и электродинамические. Обе системы снимают нагрузку с рабочей тормозной системы и тем самым повышают экономическую эффективность автомобиля. Использование гидродинамического замедлителя может продлить срок службы рабочего тормоза в 4–5 раз.

В современных автомобилях тормоза-замедлители встраиваются в систему управления торможением. Моторный тормоз и тормоз-замедлитель часто комбинируются друг с другом как тормоза непрерывного действия. В этом случае тормоза должны активироваться с помощью электронной системы управления тормозами.

Гидродинамический тормоз-замедлитель

Гидродинамические тормоза-замедлители, называемые также гидравлическими, делятся на первичные и вторичные замедлители.

Первичный тормоз-замедлитель располагается между двигателем и трансмиссией, а вторичный – между трансмиссией и ведущей осью. И первичный, и вторичный тормоза-замедлители работают одинаково. При активации тормоза-замедлителя масло закачивается в рабочую область. Ротор ускоряет это масло и перемещает его на внешнем диаметре к статору (рис. 3). Там масло попадает на статичные лопасти статора и движение масла замедляется. На внутреннем диаметре оно течет в ротор. Вращательное движение ротора затрудняется, и автомобиль замедляется.

Кинетическая энергия в основном преобразуется в тепловую. По этой причине часть масла должна постоянно охлаждаться в теплообменнике.

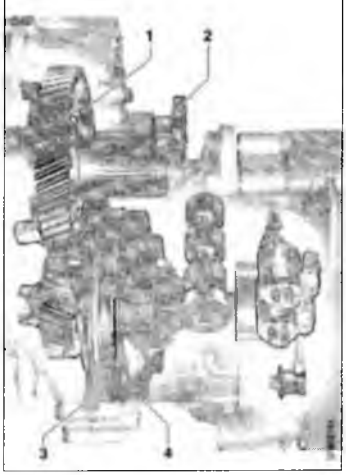
Тормозной момент может быть создан с помощью ручного рычага или педали тормоза (в случае, когда замедлитель встроен в EBS, электронно управляемую тормозную систему). Тормозной момент тормоза-замедлителя зависит от степени заполнения рабочей области между ротором и статором. Степень заполнения регулируется ЭБУ через регулировку давления пропорциональными клапанами.

Тормоз-замедлитель можно активировать гидравлически или пневматически, при этом тормозной момент может быть достигнут как в дискретных ступенях торможения, так и бесступенчато. В качестве рабочей среды в тормозе-замедлителе в основном используется масло. Современные гидравлические тормоза-замедлители могут кратковременно выдавать мощность до 600 кВт. Однако непрерывная мощность торможения тормоза-замедлителя зависит от охлаждающей способности системы охлаждения автомобиля. Современные автомобили могут рассеивать через систему охлаждения непрерывную мощность торможения тормоза-замедлителя в 300–350 кВт. Для обнаружения перегрева тормоза-замедлителя или системы охлаждения используются датчики, и при необходимости мощность торможения уменьшается в управляемых условиях до уровня, когда она становится равной количеству рассеиваемого тепла.

Первичный тормоз-замедлитель:

В случае с первичным тормозом-замедлителем, размещаемым между двигателем и трансмиссией, за конвертером, сила передается через ведущие оси и трансмиссию таким образом, что суммарный момент торможения двигателем направляется через трансмиссию. Тормозящий эффект первичного замедлителя зависит от оборотов двигателя и выбранной передачи, но не зависит от скорости автомобиля. Отсутствие этой зависимости от скорости является одним из главных преимуществ

Рис. 3. Принцип работы тормоза-замедлителя на примере тормоза-замедлителя ZF:
1 – высокоскоростной каскад; 2 – выходной фланец; 3 – статор, 4 – ротор

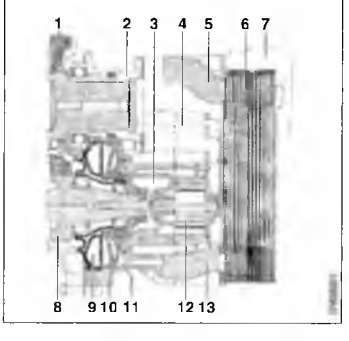


первичных тормозов-замедлителей. Они очень эффективны на скоростях до 25–30 км/ч (рис. 4). По этой причине первичные тормоза-замедлители в основном используются в автомобилях, рабочая скорость которых обычно невысокая – например, в городских автобусах и муниципальных автомобилях. Еще одним преимуществом является компактная конструкция. Недостатком первичных тормозов-замедлителей является прерывание тормозящего усилия при переключении передач. При переключении передач тормозящее усилие необходимо уменьшать.

Рис. 4. Рабочие диапазоны первичного и вторичного тормозов-замедлителей:
1 – первичный тормоз-замедлитель,
2 – вторичный тормоз-замедлитель



Рис. 5. Гидродинамический вторичный тормоз-замедлитель, мощность торможения до 600 кВт (ZF):
1 – высокоскоростной каскад; 2 – выходной фланец; 3 – тракт всасывания; 4 – корпус управления; 5 – впуск охлаждающей жидкости; 6 – теплообменник; 7 – электроника; 8 – валшестерня; 9 – статор, 10 – ротор; 11 – выпускной тракт; 12 – насос, 13 – впуск охлаждающей жидкости



Вторичный тормоз-замедлитель:
В случае со вторичным тормозом-замедлителем (рис. 5), размещаемым за двигателем, сцеплением и трансмиссией, сила передается непосредственно через выходной вал. В отличие от первичного тормоза-замедлителя, здесь не происходит прерывания тормозного усилия при переключении передач. Эффект торможения зависит от соотношения выходного вала и от скорости движения. Он не зависит от выбранной передачи. Тормозной момент вторичного тормоза-замедлителя сильно зависит от оборотов ротора. По этой причине они часто повышаются с помощью высокоскоростного каскада.

Вторичный тормоз-замедлитель имеет очень высокую эффективность на скоростях более 40 км/ч (рис. 4); на скоростях до 30 км/ч тормозной момент сильно падает. В силу своей конструкции вторичный тормоз-замедлитель можно впоследствии адаптировать к трансмиссии. Дополнительная масса вторичного тормоза-замедлителя с сопутствующим теплообменником и объемом масла часто считается недостатком, поскольку уменьшает полезную нагрузку автомобиля.

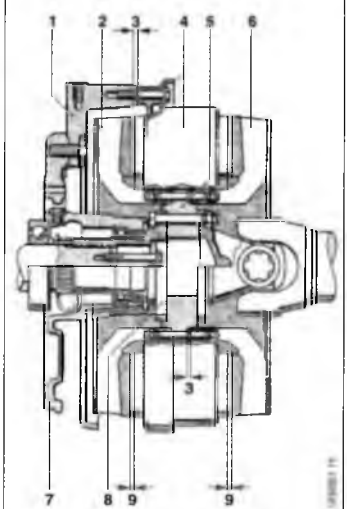
Вторичные тормоза-замедлители главным образом используются в грузовых автомобилях дальнего следования и туристических автобусах, имеющих высокую крейсерскую скорость.

Электродинамический тормоз-замедлитель (торможение вихревыми токами)
Электродинамический тормоз-замедлитель (рис. 6) имеет два немагнитных стальных диска (ротора), соединенных с торсионным натяжением с входным и выходным валами (здесь: с карданным валом), и статор с 8 или 16 катушками, и крепится с помощью звездообразного кронштейна к раме автомобиля. Как только через катушки начинает течь электрический ток (от генератора или аккумуляторной батареи), создаются магнитные поля, замыкаемые роторами. Магнитные поля наводят во вращающихся роторах вихревые токи. Эти токи, в свою очередь, создают в роторах магнитные поля, взаимодействующие с существующими магнитными полями, и в результате возникает тормозящий эффект. Тормозной момент определяется силой поля

возбуждения, скорости вращения и зазора между статором и ротором. С увеличением зазора тормозной момент уменьшается; этот зазор можно отрегулировать с помощью прокладок. Промежуточные ступени с различными тормозными моментами (рис. 7) получаются путем соединения катушек возбуждения в различных конфигурациях. Выделяемое тепло рассеивается в атмосферу путем конвекции и излучения через диски ротора с внутренней вентиляцией.

Поскольку роторы сильно нагреваются, мощность торможения электродинамического тормоза-замедлителя значительно снижается (рис. 8). Мощность торможения тормоза-замедлителя уменьшается системой защиты от перегрева во избежание разрушения тормоза-замедлителя из-за слишком высокой температуры при торможении.

Рис. 6. Электродинамический тормоз-замедлитель:
1 – звездообразный кронштейн; 2 – ротор, сторона трансмиссии, 3 – прокладки (для регулировки зазора); 4 – статор с катушками; 5 – промежуточный фланец; 6 – ротор, со стороны задней оси; 7 – крышка трансмиссии; 8 – выходные валы трансмиссии; 9 – зазор



Как и первичный тормоз-замедлитель, электродинамический тормоз-замедлитель отличается высокой мощностью торможения на низких оборотах двигателя и относительной простотой конструкции. Однако его масса может достигать 350 кг, в зависимости от размера.

Литература

[1] Hoepke, E; Breuer, S. (Editors): Nutzfahrzeugtechnik, 4th Edition, Vieweg Verlag, 2006.

Рис. 7. Характеристика тормозного момента электродинамического тормоза-замедлителя
4а – мощность торможения по достижении предельной мощности охлаждения (фаза переключения 4)

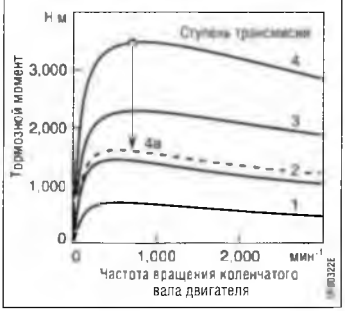
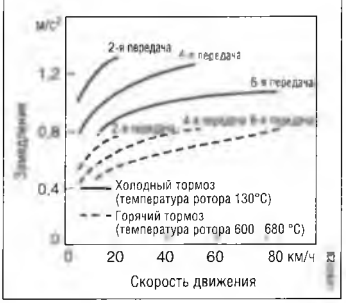


Рис. 8. Влияние передаточного числа и температуры ротора на работу электродинамических тормозов-замедлителей
Грузовик 17 т, с грузом



Колесные тормоза

В колесных тормозах гидравлическое давление (у легковых автомобилей) и пневматическое давление и усилие пружины (в подпружиненных тормозах) преобразуются в воздействующую силу. В качестве колесных тормозов используются дисковые или барабанные тормоза. В качестве дискового тормоза хорошо зарекомендовала себя конструкция с плавающим суппортом с механизмом стояночного тормоза или без такового, в то время как в барабанных тормозах сейчас используется практически исключительно симплексная конструкция.

Дисковые тормоза

Тормоз с плавающим суппортом для легковых автомобилей

Тормозной суппорт (рис. 1) может перемещаться в осевом направлении относительно тормозного диска, направляемый двумя направляющими пальцами, закрепленными в направляющей колодок, которые, в свою очередь, крепятся к поворотному кулаку.

Торможение рабочим тормозом

Создаваемое главным тормозным цилиндром гидравлическое давление попадает в камеру цилиндра за поршнем через гидравлическое соединение. Поршень сдвигается вперед, и внутренняя тормозная колодка (со стороны поршня) прижимается к тормозному диску. Возникающая реактивная сила сдвигает корпус тормозного суппорта, перемещаемого по направляющим пальцам, против направления движения поршня; это означает, что внешняя тормозная колодка также прижимается к тормозному диску. Перемещение тормозных колодок и поршня до этой точки называется зазором. С увеличением давления растет сила, с которой колодки прижимаются к диску.

Отпускание рабочего тормоза

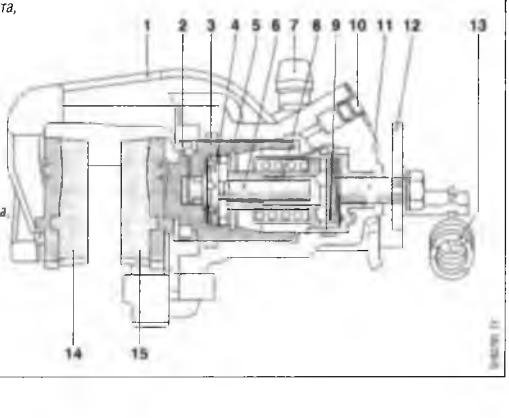
Когда поршень движется, выбирая зазор, деформируется уплотнительное кольцо, которое в исходном положении имеет прямоугольную форму. При падении гидравлического давления деформированное уплотнительное кольцо оттягивает поршень назад на величину зазора (эффект «отката»).

Торможение стояночным тормозом

При задействовании стояночного тормоза сила передается посредством троса ручного тормоза на рычаг стояночного тормоза. Тот поворачивается, и вращательное движение через вал передается на кулачковый диск. Когда шарики заходят на кулачковый диск, поршень смещается под действием механизма стояночного тормоза; винт, ввернутый в этот механизм, смещается в сторону тормозной колодки. После выбирания зазора сначала к тормозному диску прижимается тормозная колодка со стороны поршня, а затем – внешняя тормозная колодка.

Рис. 1. Тормоз с плавающим суппортом с механизмом стояночного тормоза:

1 – корпус тормозного суппорта,
2 – пыльник;
3 – уплотнительное кольцо,
4 – муфта,
5 – поршень;
6 – винт;
7 – стравливающий клапан,
8 – механизм стояночного тормоза;
9 – кулачковый диск;
10 – штуцер гидравлики,
11 – вал;
12 – рычаг стояночного тормоза,
13 – пружина;
14 – наружная тормозная колодка,
15 – внутренняя тормозная колодка



Отпускание стояночного тормоза
После отпускания ручного тормоза рычаг, а также вал и кулачковый диск возвращаются в свои исходные положения. Винт и поршень отжимаются в свое исходное положение пружинами механизма стояночного тормоза. Окончательный зазор достигается, когда уплотнительное кольцо принимает исходную форму.

Автоматический саморегулирующийся механизм
Износ тормозных колодок и тормозных дисков повышает зазор, и поэтому его необходимо компенсировать. Эта автоматическая компенсация зазора состоит в том, чтобы во время торможения поршень смещался через деформированное и предварительно напряженное уплотнительное кольцо за счет разности в размерах. Компенсация зазора механизма стояночного тормоза также применяется в рабочем тормозе.

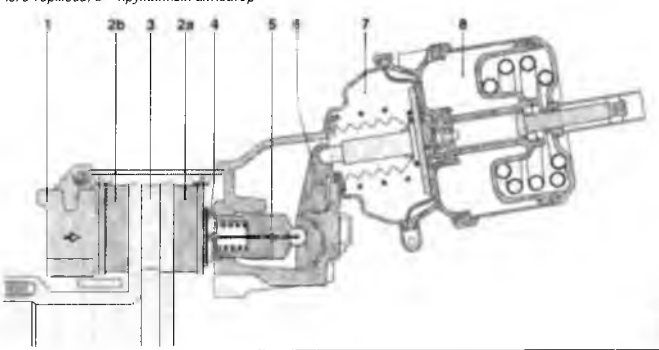
Дисковые тормоза для грузовых автомобилей
Для грузовых автомобилей разработаны специальные дисковые тормоза, приводимые в действие сжатым воздухом. Поскольку в этом случае давление намного меньше, чем в гидравлическом тормозе, тормозные цилиндры нельзя встраивать в тормозные суппорты, а необходимо крепить через фланец.

Принцип действия рабочего тормоза
Когда воздух попадает в рабочий цилиндр тормоза, приводится в действие эксцентрично смонтированный тормозной рычаг (рис. 2). Усилие, создаваемое тормозным цилиндром, увеличивается плечом рычага и передается через мост и плунжер на внутреннюю тормозную колодку. Возникающая на тормозном суппорте реактивная сила передается на внешнюю тормозную колодку путем смещения суппорта.

Принцип действия стояночного тормоза
При выпускании воздуха из тормозного цилиндра с пружинным энергоаккумулятором высвобождается сила предварительно нагруженных пружин. Она перемещает поршень пружинного тормоза и толкатель рабочего цилиндра. В случае со стояночным тормозом давление в пружинном тормозном актюаторе полностью падает, высвобождая силу предварительно напряженных пружин для достижения максимального эффекта торможения.

Дисковые тормоза, пневматически или механически управляемые пружинным актюатором, имеют функцию автоматического компенсирования зазора. Может быть также обеспечен непрерывный контроль износа. Это требуется в случае с электронными тормозными системами для адаптации износа и сервисных информационных систем.

Рис. 2. Дисковый тормоз с комбинированным тормозным цилиндром:
1 – тормозной суппорт; 2а – внутренняя тормозная колодка; 2b – внешняя тормозная колодка; 3 – тормозной диск; 4 – плунжер; 5 – мост; 6 – эксцентрично установленный тормозной рычаг; 7 – цилиндр рабочего тормоза; 8 – пружинный актюатор



Барабанные тормозные механизмы

Принцип работы

Барабанные тормоза создают тормозное усилие на внутренней фрикционной поверхности тормозного барабана (рис. 3). Этот принцип можно продемонстрировать на примере гидравлически управляемого симплексного барабанного тормоза со встроенной стояночной тормозной системой и автоматическим саморегулирующим механизмом. Другие конструкции барабанных тормозов (дуплексный тормоз, двойной дуплексный тормоз) сегодня используются редко.

В случае с симплексными тормозами двухсторонний гидравлический рабочий цилиндр создает силу, воздействующую на тормозные колодки, путем преобразования гидравлического давления в механическую силу. В грузовых автомобилях с пневматическими тормозными системами эта сила часто создается вращающимся S-образным кулачком. Вращение S-образного кулачка осуществляется тормозным цилиндром, тормозным рычагом (стягивающей муфтой) и кулачковым валом (рис. 4).

Рис. 4. Симплексный барабанный тормоз с S-образным кулачком:
1 – диафрагменный тормозной цилиндр; 2 – S-образный кулачок; 3 – тормозная колодка; 4 – стяжная пружина; 5 – тормозной барабан

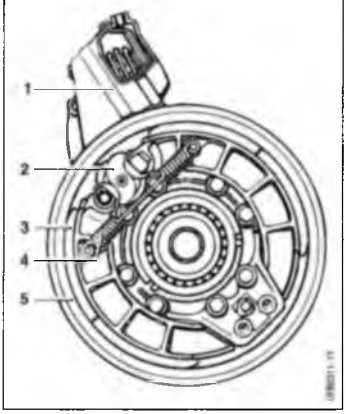
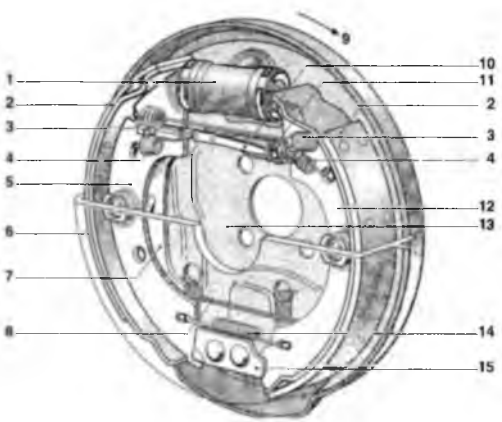


Рис. 3. Симплексный барабанный тормоз со встроенным стояночным тормозом:
1 – рабочий цилиндр; 2 – накладка тормозной колодки; 3 – верхняя стяжная пружина (тормозные колодки); 4 – пружина рычага (регулятор), 5 – задняя тормозная колодка; 6 – тормозной барабан; 7 – рычаг привода стояночного тормоза, 8 – трос стояночного тормоза; 9 – направление вращения барабана; 10 – термопара (регулятор); 11 – регулировочная гайка; 12 – передняя тормозная колодка; 13 – тормозной щит; 14 – нижняя стяжная пружина (тормозные колодки); 15 – опорная пластина



Тормоза с клиновым разжимным устройством также используются в грузовых автомобилях. Здесь прижимная сила для тормозных колодок генерируется клином, приводимым в действие тормозным цилиндром.

На тормозной колодке, прижимаемой к тормозному барабану, сила трения во время торможения создает вращающую силу вокруг оси тормозной колодки, которая в дополнение к прижимающей силе придавливает колодку к барабану. Это создает эффект самоусиления.

Автоматические регуляторы

Колесные тормоза должны снабжаться регуляторами, компенсирующими увеличение зазора, вызываемого износом колодок. Тормоза должны быть легко регулируемыми или иметь автоматический регулятор (§41 Abs. 1 StVZO, ECE R13H). На барабанных тормозах легковых автомобилей регулятор является частью распорной планки, расположенной под верхней стяжной пружиной тормозных колодок. При превышении допустимого зазора регулятор автоматически удлиняет распорную планку (на разную длину в зависимости от конструкции регулятора), регулируя зазор между тормозной колодкой и барабаном. Автоматические регуляторы в основном работают в зависимости от температуры во избежание регулировки при горячем (расширенном) барабане.

У грузовых автомобилей с S-образными кулачками регулятор является частью тормозного рычага (ручная регулировка). Регулировка выполняется автоматически, если установлены автоматические стягивающие муфты. У тормозов с клиновым разжимным устройством автоматический регулятор встроен в клиновой механизм.

Литература

[1] Breuer, B; Bill, K. (Editor): Bremsenhandbuch, 3rd Edition, Vieweg + Teubner, 2006.

Антиблокировочная система тормозов

Функции и требования

Антиблокировочные системы (ABS) представляют собой системы, оснащенные устройствами управления с обратной связью, которые предотвращают блокировку колес во время торможения и сохраняют управляемость и курсовую устойчивость автомобиля. Вообще говоря, они также сокращают тормозной путь по сравнению с торможением с полной блокировкой колес. Это особенно заметно на мокрой дороге. Сокращение тормозного пути может достигать 10% или в несколько раз больше этого значения, в зависимости от степени влажности и коэффициента трения (сцепления колес с дорогой). При определенных, очень специфических условиях тормозной путь может быть длиннее, но автомобиль все еще будет сохранять устойчивость и управляемость.

Требования, предъявляемые к системе ABS, описаны в Правилах ECE-R13 [1]. Эти Правила определяют ABS как компонент рабочей тормозной системы (рис. 1), который автоматически контролирует пробуксовывание колес в направлении вращения колес на одном или более колесах при торможении.

Приложение 13 ECE-R13 определяет три категории. Нынешнее поколение ABS отвечает высшему уровню требований (категория 1).

Принципы действия

Модуляция давления

2/2-ходовой электромагнитный клапан (впускной клапан) с двумя гидравлическими подключениями и двумя положениями включения устанавливается между главным тормозным цилиндром и тормозным цилиндром колеса традиционной тормозной системы (рис. 2). Когда клапан открыт (нормальная настройка для стандартного торможения), в тормозном цилиндре колеса может создаваться тормозное давление. Выпускной клапан, тоже 2/2-ходовой электромагнитный, в этот момент закрывается.

Если датчик угловой скорости колеса обнаружит резкое замедление колеса (риск его блокировки), то система предотвратит любое дальнейшее увеличение тормозного давления на данном колесе. Впускной и выпускной клапаны закрываются, и тормозное давление остается постоянным.

Если скорость замедления колеса продолжает расти, то должен открыться выпускной клапан. В результате давление в тормозном цилиндре колеса падает и колесо тормозится менее интенсивно. Тормозная жидкость, устремляющаяся в промежуточный резервуар, откачивается обратно в главный тормозной цилиндр возвратным насосом.

Рис. 1. Схема тормозной системы с ABS:
1 – колесные тормоза; 2 – датчики угловых скоростей колес, 3 – ЭБУ двигателя; 4 – дроссельный узел; 5 – усилитель тормозов с главным тормозным цилиндром; 6 – гидравлический блок со сменным ЭБУ

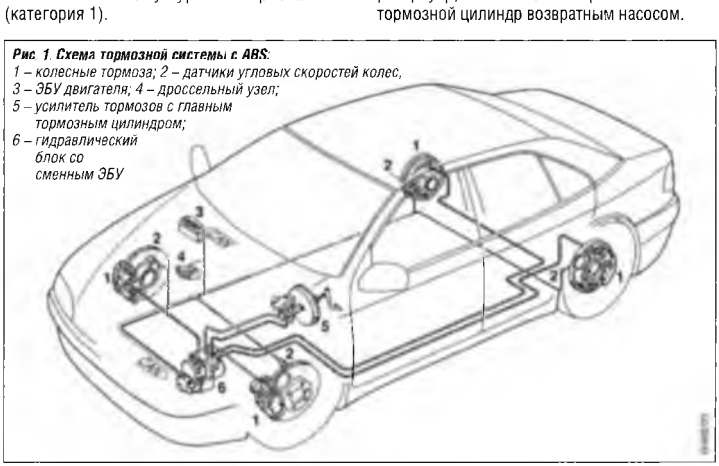
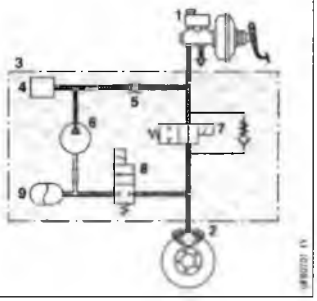


Рис. 2. Конструкция ABS:
1 – главный тормозной цилиндр; 2 – рабочий цилиндр тормозного механизма; 3 – гидравлический блок; 4 – функции сглаживания пульсаций; 5 – ограничитель потока, 6 возвратный насос; 7 – впускной клапан; 8 – выпускной клапан; 9 – промежуточный аккумулятор



Относительное скольжение колеса

Относительное скольжение колеса возникает тогда, когда скорость v_R, с которой центр колеса автомобиля движется в продольном направлении (скорость автомобиля) отличается от линейной скорости вращательного движения колеса в точке контакта с поверхностью дороги v_U. Относительное скольжение колеса λ вычисляется следующим образом:

$$\lambda = \frac{(v_U - v_R)}{v_R} \cdot 100\,\%$$

Согласно этой формуле, в случае блокировки колеса относительное скольжение составит $\lambda = -1$.

При первоначальном торможении давление в приводе возрастает; величина относительного скольжения колеса λ увеличивается и в максимальной точке на кривой сцепления с дорогой/скольжения (рис. 3) достигается граница устойчивого и нестабильного диапазонов качения колес. Начиная с этого момента, любое дальнейшее увеличение давления в приводе или тормозного момента не вызывает какого-либо дальнейшего повышения величины тормозной силы F_B (рис. 4). В устойчивом диапазоне скольжение колес в значительной степени представляет собой юз, оно имеет возрастающую тенденцию к пробуксовке в нестабильном диапазоне.

Происходит более или менее резкое падение коэффициента трения μ_{HF}, в зависимости от формы кривой сцепления в нестабильном диапазоне. Без ABS результирующий избыточный момент вызывает очень быстрое блокирование колеса при торможении.

Основные процессы управления с обратной связью

Процессы управления

Датчик угловой скорости колеса определяет скорость вращения колеса (рис. 5). Если в движении одного из колес появляются признаки блокировки, то резко возрастают замедление вращения колеса и его скольжение. Если они превышают критические значения, то блок управления ABS посылает сигналы к соленоидному распределительному клапану (гидравлическому блоку) для прекращения роста или уменьшения давления в тормозном механизме до прекращения опасности бло-

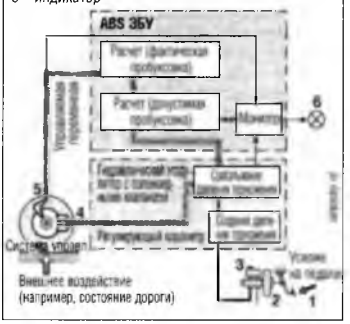
Рис. 3. Кривая зависимости сцепления с дорогой от скольжения колес:
форма кривой для сухой поверхности дороги при $\mu_{HF} = 0{,}8$; 1 – сила торможения или сила тяги; 2 – поперечное усилие



Рис. 4 Силы на затормаживаемом колесе:
a – вид сбоку; b – вид сверху; G – сила тяжести; F_B – сила торможения; F_S – поперечная сила; v_F – скорость автомобиля; r – радиус качения; n – плечо стабилизации; α – угол увода; ω – угловая скорость вращения



Рис. 5. Управляющий контур ABS:
1 – педаль тормоза; 2 – усилитель тормозов; 3 – главный тормозной цилиндр с бачком для жидкости; 4 – рабочий цилиндр тормозного механизма; 5 – датчик угловой скорости колеса; 6 – индикатор



кировки. Затем давление должно быть восстановлено для предотвращения недоторма-живания колеса. Во время автоматического управления торможением необходимо постоянно определять устойчивое и нестабильное качение колес и удерживать его в диапазоне пробуксовки при максимальном тормозном усилии путем чередования фаз повышения, удержания и уменьшения давления.

Применительно у передним колесам эта последовательность управления выполняется индивидуально, т.е. отдельно на каждом колесе. Из соображений обеспечения устойчивости для задних колес требуется другая стратегия управления. Чтобы можно было поддерживать боковое ускорение и, соответственно, поперечные силы, на задних колесах при сохранении полной мощности на поворотах требуется увеличение коэффициентов бокового трения шин. Поэтому уровни пробуксовки задних колес должны быть минимальными, особенно у колеса на внешнем радиусе поворота. Это достигается за счет особой характеристики управления торможением задних колес «select-low» или SL. Она означает, что последовательность управления определяется задним колесом, которое первым показывает признаки скорого блокирования. В 3-канальной конфигурации тормозной системы с раздельным торможением передних и задних колес (см. «Варианты систем ABS»), это достигается путем параллельного соединения гидравлических контуров. Однако в диагонально разделенных тормозных контурах это достигается путем управления распределительными клапанами задних колес с логикой параллельного воздействия.

Воздействие на замкнутый контур управления
При разработке системы ABS принимают во внимание следующее:
- варианты сцепления между шиной и дорогой;
- неровности дорожного покрытия, вызывающие колебания колес и осей;
- овальность, тормозной гистерезис, снижение эффективности тормозов;
- изменения давления в главном тормозном цилиндре при воздействии водителя на педаль тормоза;
- изменения радиуса колеса, например при установке запасного колеса.

Критерии качества управления:
Эффективные антиблокировочные системы должны отвечать следующим критериям качества управления:
- сохранение курсовой устойчивости путем обеспечения достаточных боковых сил на задних колесах;
- сохранение управляемости путем обеспечения достаточных боковых сил на задних колесах;
- уменьшение тормозного пути по сравнению с торможением с блокировкой колес путем оптимизации сцепления шин с дорогой;
- быстрая корректировка тормозных сил для различных коэффициентов сцепления, например, когда автомобиль движется по лужам, через небольшие участки льда или укатанного снега;
- обеспечение небольшой амплитуды тормозного момента во избежание вибраций в подвеске;
- достижение высокого уровня комфорта путем использования бесшумных актюаторов и обратной связи через педаль тормоза.

Типичный цикл управления
Изображенный на рис. 6 цикл управления показывает автоматическое управление тормозами в случае высокого коэффициента трения. Изменение скорости вращения колеса (замедление при торможении) вычисляется с помощью электронного блока управления. После того, как эта величина упадет ниже определенного порога («–a»), клапан ги-

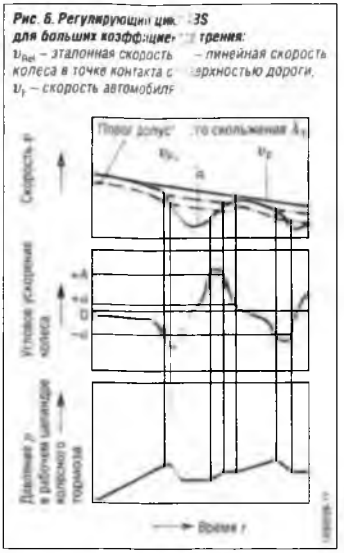


Рис. 6. Регулирующий цикл ABS для больших коэффициентов трения: v_{Rad} – эталонная скорость колеса в точке контакта с поверхностью дороги, v_f – скорость автомобиля

дравлического модулятора переключается в режим удержания давления. Если далее скорость вращения колеса уменьшится ниже порога допустимого скольжения λ_1, то клапан переключается на сброс давления, который длится до тех пор, пока замедление колеса не достигнет снова значения «–a». В течение последующей фазы удержания давления ускорение увеличивается до пороговой величины «+α», затем тормозное давление поддерживается на постоянном уровне.

После превышения высокого порога «+A» происходит увеличение давления, колесо чрезмерно не ускоряется, так как вступает в диапазон устойчивого торможения. После уменьшения ускорения до порога (+α) давление начинает медленно увеличиваться до тех пор, пока ускорение колеса не станет снова меньше порога (–α). В это время начинается следующий цикл управления.

Во время первого цикла управления первоначально была необходима короткая фаза удержания давления для фильтрования помех. В случае большого момента инерции колеса, малого коэффициента сцепления и медленного возрастания давления в рабочем цилиндре тормозного механизма (осторожное начальное торможение, например на льду) колесо может заблокироваться без замедления, на которое система может отреагировать. В этом случае в работе системы ABS учитывается пробуксовка колес.

При определенных условиях и состоянии дорожного покрытия на легковых автомобилях с приводом на четыре колеса и блокировкой дифференциала часто сталкиваются с проблемами при использовании ABS; это вынуждает прибегнуть к специальным мерам определения скорости движения во время процесса управления, более низким пороговым величинам замедления колес и уменьшению крутящего момента двигателя.

Управление работой тормоза с задержкой увеличения момента вращения автомобиля вокруг вертикальной оси

При торможении на дороге с неодинаковыми коэффициентами трения (например, разными значениями μ: левые колеса на сухом асфальте, правые колеса – на льду), сильно отличающиеся тормозные силы на передних колесах приведут к возникновению момента вращения автомобиля вокруг вертикальной оси (рис. 7).

На легковых автомобилях малого класса система ABS должна дополняться устройством задержки увеличения момента вращения автомобиля вокруг вертикальной оси в целях поддержания управляемости во время экстренного торможения на неоднородном дорожном покрытии. Задержка увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси ограничивает

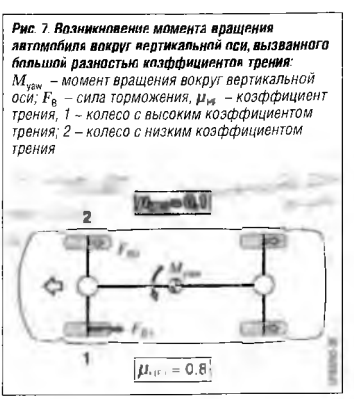


Рис. 7. Возникновение момента вращения автомобиля вокруг вертикальной оси, вызванного большой разностью коэффициентов трения: $M_{увм}$ – момент вращения вокруг вертикальной оси; F_B – сила торможения, $\mu_{1/2}$ – коэффициент трения, 1 – колесо с высоким коэффициентом трения; 2 – колесо с низким коэффициентом трения

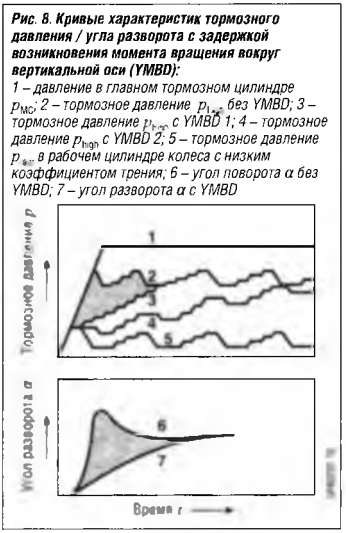


Рис. 8. Кривые характеристик тормозного давления / угла разворота с задержкой возникновения момента вращения вокруг вертикальной оси (YMBD):
1 – давление в главном тормозном цилиндре p_{MC}; 2 – тормозное давление p_{high} без YMBD; 3 – тормозное давление p_{high} с YMBD 1; 4 – тормозное давление p_{high} с YMBD 2; 5 – тормозное давление p_{low} в рабочем цилиндре колеса с низким коэффициентом трения; 6 – угол поворота α без YMBD; 7 – угол разворота α с YMBD

рост давления в рабочем цилиндре переднего колеса с более высоким коэффициентом сцепления с дорожным покрытием.

Концепция задержки увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси продемонстрирована на рис. 8: кривая 1 представляет собой давление в главном тормозном цилиндре p_{MC}. Без задержки увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси (т.н. системы YMBD) тормозное давление на колесе, движущемся по асфальту, быстро достигает величины p_{high} (кривая 2), тормозное давление на колесе, движущемся по льду вырастает лишь до p_{low} (кривая 5); каждое колесо тормозит с максимальным передаваемым тормозным усилием (индивидуальное управление).

Система YMBD 1 (кривая 3) подходит для автомобилей, для которых характеристики управляемости менее критичны, а YMBD 2 – для автомобилей, более склонных к потере курсовой устойчивости из-за возникновения момента вращения вокруг вертикальной оси (кривая 4).

Во всех случаях, когда используется система YMBD, сначала недоторможивается колесо с меньшей пробуксовкой. Это означает, что задержка увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси должна всегда быть очень тщательно адаптирована к данному автомобилю, чтобы ограничить увеличение тормозного пути.

Варианты систем ABS

В настоящее время предлагается несколько версий ABS в зависимости от конфигурации тормозных контуров, конфигурации привода и трансмиссии, функциональных требований и бюджета. Наиболее популярным распределением тормозных сил является диагональное разделение (X-образная конфигурация тормозных контуров), менее популярным – разделение передних и задних колес (II-образная конфигурация тормозных контуров). Конфигурации HI и HH (например, в Daimler Maybach) являются специализированными и редко используются в сочетании с ABS.

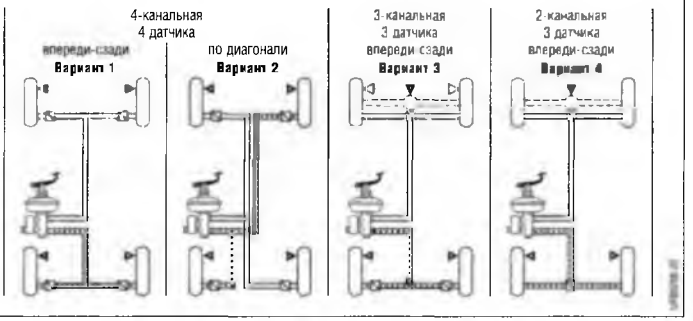
Варианты систем ABS различаются по количеству каналов управления и датчиков угловых скоростей колес.

4-канальная система с 4 датчиками
Эти системы (рис. 9) позволяют индивидуально регулировать тормозное давление на каждом колесе по четырем гидравлическим каналам, с разделением тормозных контуров между передними и задними колесами (для II-образной конфигурации тормозных контуров) или диагональным распределением (для X-образной конфигурации тормозных контуров). У каждого колеса есть свой датчик, измеряющий угловую скорость.

Для сегмента сверхкомпактных автомобилей с рабочим объемом двигателя до 660 куб.см (MIDGET) японского рынка был разработан сильно упрощенный вариант ABS. Он положил конец демпфирующим камерам и возвратным насосам. Небольшое количество компонентов по сравнению с традиционными системами обеспечивает значительную экономию, но имеет и ряд функциональных недостатков. Производство систем этого типа постепенно прекращается.

3-канальная система с 3 датчиками
Вместо привычного расположения с отдельным датчиком угловой скорости на каждом колесе в этом варианте у задних колес имеется один датчик, устанавливаемый в дифференциале. В силу характеристик дифференциала он позволяет измерять разность угловых скоростей колес с определенными

Рис. 9. Варианты систем ABS:
▨ – канал управления; ◁ – датчик; ◁ – датчик, альтернативный по отношению к датчику дифференциала



ограничениями. Характеристики управления SL для задних колес, т.е. параллельное соединение тормозов двух задних колес, позволяют обойтись одним гидравлическим каналом для (параллельного) регулирования давления задних колес.
Гидравлические 3-канальные системы требуют II-образной конфигурации тормозных контуров (разделение передних и задних колес).

Системы с 3 датчиками можно использовать только в автомобилях с задним приводом, главным образом, в грузовиках. Количество автомобилей, оснащаемых такими системами, падает.

2-канальная система с 1 или 2 датчиками
2-канальные системы начали производить из-за небольшого количества требуемых компонентов и, соответственно, возможности экономии затрат. Их популярность была ограничена, так как их функциональность была недостаточной. Эти системы сейчас практически не используются в автомобилях.

Некоторые продаваемые в США легкие грузовики с межосевым разделением тормозных контуров все еще оснащаются системами RWAL (Rear Wheel Anti-Lock, антиблокировочная система для задних колес) – специальными упрощенными версиями 2-канальной системы, состоящими из датчика на дифференциале заднего моста и одиночного управляющего канала (без возвратного насоса), предотвращающего блокировку задних колес. При достаточно большом тормозном давлении передние колеса все равно могут заблокироваться, что приводит к риску потери управляемости при определенных условиях.

Такая система не отвечает функциональным требованиям, предъявляемым к системам ABS Категории 1.

Использование ABS на мотоциклах
За последние годы удалось существенно снизить размер и массу систем ABS. В результате серийно производимые системы ABS стали привлекательной опцией для мотоциклов. Следовательно, этот класс транспортных средств сможет воспользоваться преимуществами ABS как системы безопасности.

Автомобильная система для использования в мотоциклах модифицируется. Вместо привычных восьми 2/2-ходовых клапанов в гидравлическом блоке у автомобилей (с X-образной конфигурацией тормозных контуров), у мотоциклов обычно применяется четыре клапана. Алгоритм управления также кардинально отличается от используемого в автомобильной системе ABS.

Другие варианты системы появились в результате спроса на комбинированные тормозные системы (CBS), т.е. системы, в которых и передними, и задними тормозами можно управлять либо педалью, либо ручным рычагом, возможно в сочетании с отдельными средствами активации передних тормозов. Для этого типа требуется 3-канальный гидравлический блок. Однако конструкция варианта CBS сильно зависит от модели мотоцикла.

Примеры систем ABS

Гидравлический блок

Разработка электромагнитных клапанов с двумя положениями переключения гидравлики (2/2-ходовые клапаны, используемые в системах ABS Bosch, начиная с 5-го поколения ABS) позволила полностью изменить ABS по сравнению с версией ABS-2S/ABS-2E, где использовались 3/3-ходовые клапаны. Это радикально рационализировало конструкцию и изготовление. Однако базовая гидравлическая концепция ABS не изменилась с начала серийного производства в 1978 году. Это означает, что герметичные тормозные контуры и принцип возврата жидкости остались теми же.

Главные компоненты гидравлического блока, называемого также гидравлическим модулятором, следующие (рис. 10):

- по одному возвратному насосу на тормозной контур;
- аккумуляторная камера;
- демпфирующие функции, ранее выполнявшиеся аккумуляторной камерой и ограничителем потока, теперь выполняются как гидравлически, так и системами управления, т.е. программным обеспечением;
- 2/2-ходовые электромагнитные клапаны с двумя гидравлическими позициями и двумя гидравлическими подключениями.

Для каждого колеса имеется одна пара электромагнитных клапанов (кроме случая с 3-канальными конфигурациями с межосевым разделением тормозных контуров), один из которых открывается в обесточенном состоянии для увеличения давления (впускной клапан, IV), а другой закрывается в обесточенном состоянии для снижения давления (выпускной клапан, OV). Обратный клапан устанавливают параллельно с впускным клапаном для более быстрого уменьшения давления в колесных тормозах при прекращении их работы.

Распределение функций увеличения и уменьшения давления между отдельными электромагнитными клапанами только с одной активной настройкой (под напряжением) позволило сделать конструкцию клапанов компактной – уменьшить размеры и массу, а также снизить магнитные силы по сравнению с использовавшимися ранее 3/3-ходовыми электромагнитными клапанами. Это позволяет оптимизировать электрическое управление с небольшими потерями электрической мощности в катушках электромагнитных клапанов и в блоке управления. Кроме того, клапанный блок (рис. 11) можно сделать меньшего размера. Это выливается в довольно значительную экономию массы и габаритов.

2/2-ходовые электромагнитные клапаны бывают разной конструкции и с разными характе-

Рис. 10. Гидравлическая схема антиблокировочной тормозной системы:
1 – главный тормозной цилиндр, 2 – тормозной цилиндр ; 3 – гидравлический блок, 4 – впускные клапаны; 5 – выпускные клапаны; 6 – возвратный насос; 7 – аккумулятор; 8 – двигатель насоса; r – правый; L – левый; F – передний; R – задний

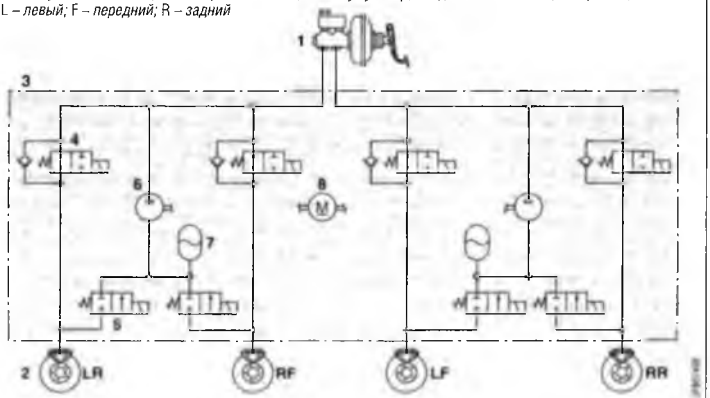


Рис. 11. Конструкция гидравлического блока ABS 8:
1 – блок управления; 2 – катушки; 3 – гидравлический блок; 4 – двигатель насоса



ристиками, и в силу своих компактных размеров и превосходной динамики они обеспечивают достаточно быстрое электрическое переключение для циклической работы с широтно-импульсной модуляцией. Другими словами, они имеют характеристики пропорциональных клапанов.

Система ABS 8 имеет клапанное регулирование с модуляцией «ток-сигнал», существенно улучшающее функции (например, адаптацию к изменениям коэффициента трения) и упрощенное управление (меньше колебания ускорения благодаря ступеням давления и аналоговому регулированию давления). Эта мехатронная оптимизация оказывает положительный эффект не только на функции, но и на удобство в использовании, т.е. на шум и обратную связь на педали.

ABS 8 позволяет специфически адаптироваться к индивидуальным требованиям по классам автомобилей путем изменения компонентов (использование двигателей разной мощности, варьирование размера аккумуляторной камеры и т.д.). Мощность двигателя возвратного насоса может варьироваться в пределах 90 – 200 Вт. Можно также изменять размер аккумуляторной камеры.

Электронный блок управления (ЭБУ)

Результаты, достигнутые в процессе развития системы ABS, главным образом являются следствием огромного прогресса в области электроники. Времена, когда ЭБУ ABS состоял из более 1000 деталей (ABS 1-го поколения – из 1970 деталей, аналоговая конструкция) уже далеко позади. Интеграция функций в контуры LSI, использование высокопроизводительных микрокомпьютеров и гибридной технологии ЭБУ обеспечивают высокую монтажную плотность и, следовательно, дальнейшую миниатюризацию. В то же время, это приводит к значительному повышению эффективности и функциональности системы. Использование микропроцессоров позволило достичь значительной оптимизации алгоритмов управления, включая адаптацию к требованиям изготовителей автомобилей и особенностям моделей.

Блок управления выполняется в виде сменного ЭБУ и монтируется прямо на гидравлический блок. Преимущество такого размещения состоит в возможности минимизации внешней проводки. В жгуте становится меньше проводов. В результате сокращается потребность в пространстве и упрощается монтаж. Компоновочная схема требует лишь одного штекерного соединения между ЭБУ и гидравлическим блоком и для подключения двигателя возвратного насоса.

ЭБУ, схематически изображенный на рис. 12, представляет собой 4-канальную версию с 4 датчиками. Два микроконтроллера обрабатывают программу управления. В ЭБУ систем ABS они имеют частоту около 20 МГц и объем памяти около 128 кБ. Для версий ABS со специальными функциями достаточно памяти около 256 кБ.

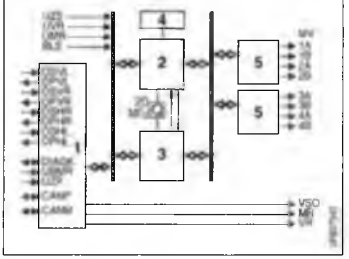
В очень сложных системах, таких как система динамической стабилизации (ESP),

объем памяти может достигать 1 МБ. В зависимости от того, какая скорость обработки необходима, могут использоваться и микропроцессоры с более высокой тактовой частотой.

Программное обеспечение состоит из следующих модулей:
- операционная система;
- ПО для самодиагностики;
- ПО для различных функций;
- ПО автопроизводителей и ПО для различных приложений.

Обмен данными с другими ЭБУ и диагностика осуществляются по шине CAN или FlexRay.

Рис. 12. Принципиальная схема ЭБУ:
1 – многофункциональный контур с входным контуром, контуром обработки сигнала скорости, контуром диагностики, регулятором напряжения, CAN, контуром релейного регулирования и т.д.; 2 – микроконтроллер 1; 3 – микроконтроллер 2; 4 – ПЗУ; 5 – модуль с выходным каскадом; DS *– датчики угловой скорости колес;* P *– выходы сигналов скорости (например, для комбинация приборов);* V *– передний;* H *– задний,* L *– левый,* R *– правый;* MV *– электромагнитный клапан*



Антиблокировочная тормозная система для коммерческих автомобилей

Антиблокировочная тормозная система предотвращает блокирование колес при слишком сильном торможении. Поэтому автомобиль сохраняет курсовую устойчивость и управляемость даже при экстренном торможении на скользкой дороге. Антиблокировочная тормозная система предотвращает опасность складывания автопоезда.

В отличие от легковых, грузовые автомобили имеют пневматические тормозные системы. Тем не менее, функциональное описание процесса управления ABS для легковых автомобилей в принципе применимо и к грузовым.

Методы управления ABS

Индивидуальное управление (IR)

Процесс, при котором устанавливается и контролируется оптимальное давление индивидуально для каждого колеса, что позволяет получать наименьший тормозной путь. В условиях с μ-разделением (разное сцепление с дорогой ведущих колес – например, на одной колее асфальт, а на другой – лед), при торможении возникает большой момент вращения автомобиля вокруг вертикальной оси, что усложняет управляемость автомобилей с короткой колесной базой. Это сопряжено с возникновением большого крутящего момента в рулевом управлении из-за повышенного плеча обкатки на грузовых автомобилях. Индивидуальное управление обычно используется в грузовых автомобилях на заднем мосту.

Управление "select-low" (SL)

Этот процесс уменьшает момент вращения автомобиля вокруг вертикальной оси и момент в рулевом управлении до нуля. Это достигается путем создания одинакового тормозного давления на обоих колесах оси. Для этой цели используется один клапан управления давлением в обоих колесах одной оси. В случае чистого управления SL уровень давления определяется по колесу, которое осуществляет движение на покрытии с наименьшим коэффициентом сцепления. В условиях μ-разделения тормозной путь увеличивается, но управляемость и курсовая устойчивость автомобиля улучшаются. Если сцепление с дорогой (коэффициенты трения) одинаковы на обеих колеях, то тормозной путь, управляемость и курсовая устойчи-

вость практически идентичны у систем индивидуального управления (IR).

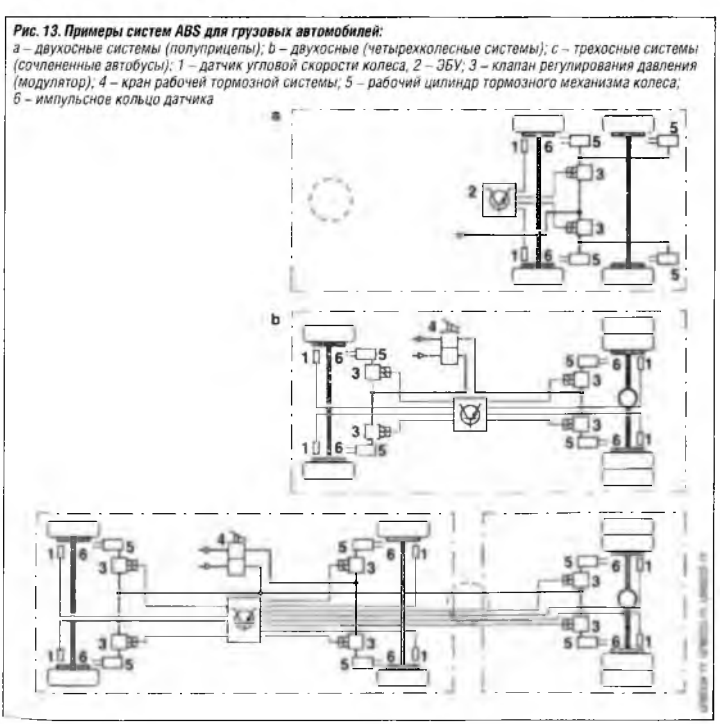
Индивидуальное управление, модифицированное (IRM)

При этом процессе на каждом колесе оси устанавливается клапан модулирования давления. Моменты увода уменьшаются лишь настолько, насколько это необходимо, и ограничивается разность тормозного давления между левой и правой сторонами до допустимого уровня. В результате колесо, имеющее более высокий коэффициент трения, тормозится чуть меньше. Такое компромиссное решение приводит к немного большему тормозному пути, чем во время индивидуального управления, однако обеспечивается более безопасное управление автомобилем.

Оборудование ABS для коммерческих автомобилей

Современные ЭБУ ABS для грузовиков, тягачей, автобусов можно использовать на двух- и трехосных автомобилях (рис. 13). Во время запоминания значений при первом вводе в эксплуатацию блок управления настраивается на соответствующий автомобиль в зависимости от подключенных компонентов. Это включает в себя определение количества осей, метода управления ABS и дополнительные функции, которые могут оказаться необходимыми, такие как система управления тяговым усилием TCS. Схожая ситуация имеет место и с ЭБУ ABS для прицепов и полуприцепов. Один и тот же ЭБУ можно использовать в прицепах и полуприцепах с одной, двумя и тремя осями и адаптировать к уровню имеющегося оборудования.

Рис. 13. Примеры систем ABS для грузовых автомобилей:
a – двухосные системы (полуприцепы); b – двухосные (четырехколесные системы); c – трехосные системы (сочлененные автобусы); 1 – датчик угловой скорости колеса, 2 – ЭБУ; 3 – клапан регулирования давления (модулятор); 4 – кран рабочей тормозной системы; 5 – рабочий цилиндр тормозного механизма колеса; 6 – импульсное кольцо датчика



Если одна ось является подъемной, то она автоматически исключается из процесса управления ABS при ее подъеме.

Когда две оси находятся близко друг к другу, часто только одна из них оснащается датчиками угловой скорости колес. Тормозное давление двух соседних колес регулируется совместно одним клапаном регулирования давления. На многоосных автомобилях с большими расстояниями между осями, например у сочлененных автобусов, предпочтительным является трехосное управление.

Индивидуальное модифицированное управление (IRM) чаще всего используется на управляемых осях; управление SL тоже иногда применяется, но очень редко. На задних осях тягачей обычно выбирается индивидуальное управление.

Блок управления позволяет управлять различными модификациями, здесь подробно не описываемыми. Например, обе оси полуприцепа имеют датчики частоты вращения колес, однако каждая сторона оснащена только одним клапаном модуляции давления, и колеса одной стороны находятся под управлением типа SL.

Все системы ABS могут оснащаться одноканальными клапанами регулирования давления. Системы ABS прицепов могут оборудоваться модуляторами давления с клапанами управления.

Для грузовых автомобилей небольшой грузоподъемности с пневмогидравлическим приводом тормозов ABS подключается в пневматическую магистраль посредством одноканальных модуляторов давления и определяет давление в гидравлической тормозной магистрали.

Когда автомобиль эксплуатируется на дорогах с низким коэффициентом сцепления, то работа вспомогательной тормозной системы во время торможения может привести к чрезмерному проскальзыванию ведущих колес. Это может ухудшить курсовую устойчивость автомобиля. Поэтому ABS контролирует пробуксовку и регулирует ее до определенного допустимого уровня при включении и выключении тормоза-замедлителя.

Компоненты ABS

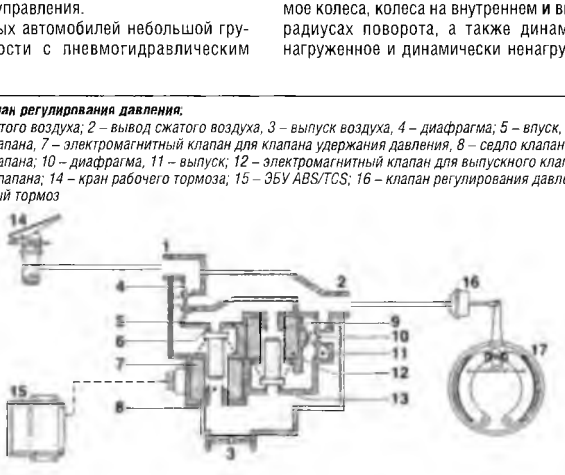
Датчики угловой скорости колес

Вращение колес контролируется датчиками угловой скорости колес (индуктивных либо датчиков Холла). В сочетании с импульсным кольцом, вращающимся со скоростью колеса, они генерируют соответствующий электрический сигнал. Электрические сигналы обрабатываются в ЭБУ.

Электронный блок управления (ЭБУ)

ЭБУ обрабатывает сигналы датчиков угловых скоростей колес. Затем сигналы сравниваются. Всегда сравниваются ведущее и ведомое колеса, колеса на внутреннем и внешнем радиусах поворота, а также динамически нагруженное и динамически ненагруженное

Рис. 14. Клапан регулирования давления:
1 – ввод сжатого воздуха; 2 – вывод сжатого воздуха, 3 – выпуск воздуха, 4 – диафрагма; 5 – впуск, 6 – седло клапана, 7 – электромагнитный клапан для клапана удержания давления, 8 – седло клапана, 9 – седло клапана; 10 – диафрагма, 11 – выпуск; 12 – электромагнитный клапан для выпускного клапана; 13 – седло клапана; 14 – кран рабочего тормоза; 15 – ЭБУ ABS/TCS; 16 – клапан регулирования давления; 17 – колесный тормоз



колеса. На их основании вычисляется пробуксовывание отдельных колес и активируются соответствующие клапаны регулирования давления.

Другие функции, такие как автоматическое отключение тормоза-замедлителя, могут быть выполнены в процессе управления. ЭБУ ABS снабжаются предохранительным контуром, непрерывно контролирующим всю систему. При обнаружении сбоев происходит частичное или полное выключение системы. Коды неисправностей хранятся в ЗУ неисправностей и могут быть считаны с помощью диагностического тестера и удалены из ЗУ после устранения неисправностей.

Некоторые ЭБУ содержат не только функцию ABS, но и также другие функции, например, систему управления тяговым усилием (TCS) или управления крутящим моментом двигателя (MSR).

Клапан регулирования давления

Клапаны регулирования давления размещаются между клапаном рабочего тормоза и рабочими цилиндрами тормозных механизмов колес и контролируют тормозное давление одного или более колес (рис. 14). Клапаны регулирования давления состоят из комбинации электромагнитных и пневматических клапанов. Они обычно содержат один выпускной клапан и один клапан удержания давления (одноканальный клапан регулирования давления), но также может использоваться комбинация из одного выпускного клапана и двух клапанов удержания давления (двухканальный клапан регулирования давления). Электроника управляет электромагнитными клапанами в соответствующей комбинации с целью достижения требуемых режимов поддержания или уменьшения давления. При выключенных клапанах создается режим нарастания давления.

Когда осуществляется обычное торможение (без вмешательства ABS, т. е. при отсутствии тенденции блокировки колеса), воздух проходит через модуляторы давления свободно в обоих направлениях. Это обеспечивает безотказную работу рабочей тормозной системы.

Литература

[1] ECE-R13: Стандартные условия сертификации автомобилей категорий M, N и O в отношении тормозов.

Система управления тяговым усилием

Функции и требования

При трогании с места, разгоне и торможении эффективность передачи сил на дорогу зависит от сцепления шин с дорогой. Кривые сцепления / скольжения для разгона и торможения имеют одинаковые базовые рисунки (рис. 1).

В подавляющем большинстве операций разгона и торможения присутствует лишь ограниченная степень пробуксовки, благодаря чему реакция остается в устойчивом диапазоне кривых сцепления / скольжения. До определенной точки любое увеличение пробуксовки сопровождается соответствующим увеличением полезного сцепления. За этой точкой дальнейшее увеличение пробуксовки переводит кривые через максимум и в неустойчивый диапазон, где любое увеличение пробуксовки обычно приводит к ухудшению сцепления с дорогой. При торможении это ведет к блокировке колеса за несколько десятых долей секунды. Во время ускорения автомобиля, когда излишний крутящий момент преодолевает сцепление шин с дорогой, это приводит к быстрому повышению частоты вращения одного или обоих ведущих колес.

Антиблокировочная тормозная система в первом случае (при торможении) реагирует предотвращением блокировки колеса. Система управления тяговым усилием (TCS) поддерживает пробуксовку ведущих колес в пределах допустимого уровня, выполняя следующие функции:

- увеличение тягового усилия (электронное блокирование дифференциала);
- поддержание устойчивости автомобиля.

Эти функции выполняются системой управления тяговым усилием. Она должна:

- надежно предотвращать пробуксовку ведущих колес в условиях μ-разделения и на скользкой дороге;
- предотвращать пробуксовку колес при трогании с места на льду;
- предотвращать пробуксовку колес при ускорении на поворотах;
- предотвращать пробуксовку колес при трогании на склонах;
- обеспечивать курсовую устойчивость автомобиля на поворотах.

Регулирующие контуры системы управления тяговым усилием (TCS)

Система управления тяговым усилием является составной частью электронных систем управления пробуксовкой колес. Поэтому для TCS можно использовать уже установленные компоненты и в любом случае необходимые для ABS, например, датчики угловых скоростей колес.

Управление тяговым усилием происходит главным образом посредством двух разных регулирующих воздействий, адаптированных к индивидуальным обстоятельствам – вмешательство тормозной системы и управление работой двигателя при круиз-контроле.

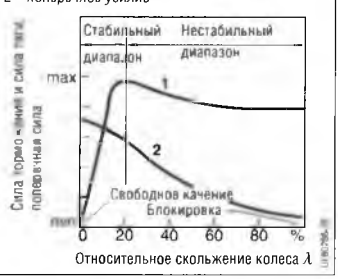
Вмешательство тормозной системы

Вмешательство тормозной системы обычно происходит на малых скоростях при пробуксовке одного из приводных колес из-за недостаточного сцепления с дорогой. Во время вмешательства тормозной системы на тормоз буксующего колеса подается тормозное давление, адаптированное к ситуации, и крутящий момент передается через дифференциал на другое, не буксующее колесо. Создается нечто вроде блокировки дифференциала.

Вмешательство тормозной системы в грузовых автомобилях

В грузовых автомобилях с пневматическими тормозными системами для вмешательства тор-

Рис. 1. Кривая зависимости сцепления с дорогой от скольжения колес:
форма кривой для сухой поверхности дороги при $\mu_{sl} \approx 0{,}8$; 1 – сила торможения или сила тяги, 2 – поперечное усилие



мозов требуются электромагнитный клапан TCS и пневматический золотниковый клапан (рис. 2). При необходимости вмешательства тормозов электрически активируемый электромагнитный клапан TCS подает давление через золотниковый клапан на клапаны регулирования давления ABS. Одновременно с этим золотниковый клапан блокирует соединение с клапаном рабочего тормоза. В это же время электрически активируется электромагнитный клапан удержания давления в клапане регулирования давления ABS не буксующего колеса. Это исключает возможность нагнетания давления в рабочем цилиндре тормозного механизма колеса.

Электромагнитные клапаны в клапане регулирования давления ABS буксующего колеса сначала не активируются. В соответствующем тормозном цилиндре колеса нагнетается тормозное давление, в результате чего колесо тормозится, и его пробуксовывание предотвращается. Тормозное давление нагнетается в соответствии с ситуацией и адаптируется при непрерывном контроле процесса управления путем изменения и электрически синхронизированной активации соответствующих электромагнитных клапанов в клапанах регулирования давления.

Блок управления TCS отключает вмешательство тормозной системы при достижении однородных условий пробуксовки. Клапан TCS и электромагнитные клапаны в клапане регулирования давления ABS больше не активируются. Тормозное давление в рабочем цилиндре соответствующего колеса снижается, при этом воздух через стравливающий клапан в клапане регулирования давления выпускается в атмосферу.

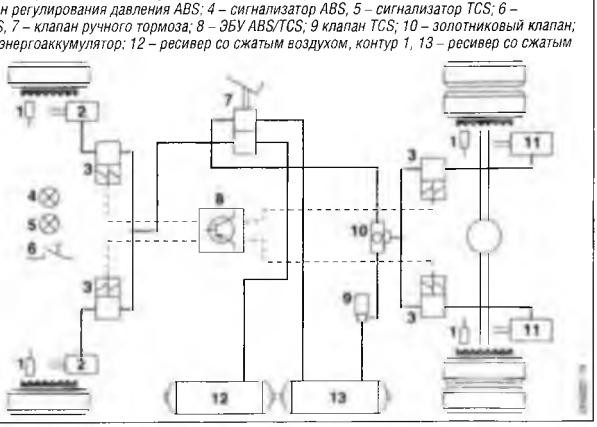
С помощью описанной выше функции управления тормозами приводные колеса тоже можно синхронизировать, так чтобы механическая блокировка дифференциала могла включиться автоматически, например, с помощью пневмоцилиндра. ЭБУ ABS/TCS вычисляет нужный момент и условия блокировки дифференциала.

В отличие от механической блокировки дифференциала шины не стираются на крутых поворотах. Фундаментальным отличием такой системы (когда в ней используется функция электронного управления тормозами) является то, что она не предназначена для непрерывного использования в сложных внедорожных условиях. Поскольку функция управления тормозами достигается путем притормаживания соответствующего колеса, то неизбежно происходит нагрев тормозов.

Вмешательство тормозной системы в легковых автомобилях

В легковых автомобилях с гидравлическими тормозными системами для вмешательства тормозов TCS требуется расширенный гидравлический блок ABS. В зависимости от варианта расширение могут подразумеваться впускной клапан и направляющий гидрораспределитель (рис. 3).

Рис. 2. Система управления тяговым усилием для грузовых автомобилей:
1 – датчик угловой скорости колеса с импульсным кольцом; 2 – рабочий цилиндр тормозного механизма колеса; 3 – клапан регулирования давления ABS; 4 – сигнализатор ABS, 5 – сигнализатор TCS; 6 – выключатель TCS, 7 – клапан ручного тормоза; 8 – ЭБУ ABS/TCS; 9 клапан TCS; 10 – золотниковый клапан; 11 – пружинный энергоаккумулятор; 12 – ресивер со сжатым воздухом, контур 1, 13 – ресивер со сжатым воздухом, контур 2



Могут потребоваться дополнительный гидравлический подпиточный насос и аккумулятор давления. Во время необходимого вмешательства тормозов электрически активируются впускной клапан и направляющий гидрораспределитель буксующего колеса и возвратный насос ABS. Возвратный насос перекачивает тормозную жидкость от главного тормозного цилиндра через впускной клапан. Направляющий гидрораспределитель блокирует отток обратно к главному тормозному цилиндру. Давление, нагнетаемое возвратным насосом, попадает через впускной клапан в рабочий тормозной цилиндр буксующего колеса, в результате колесо тормозится и его буксование предотвращается. Тормозное давление нагнетается в соответствии с ситуацией и адаптируется при непрерывном контроле процесса управления путем изменения и электрически синхронизированной активации впускных и выпускных клапанов в гидравлическом блоке.

По завершении фазы регулирования прекращается электрическая активация, и тормозное давление, созданное для TCS, как после обычного торможения, уменьшается через впускной клапан, направляющий тормозную жидкость через гидрораспределитель и главный тормозной цилиндр.

Управление работой двигателя при круиз-контроле

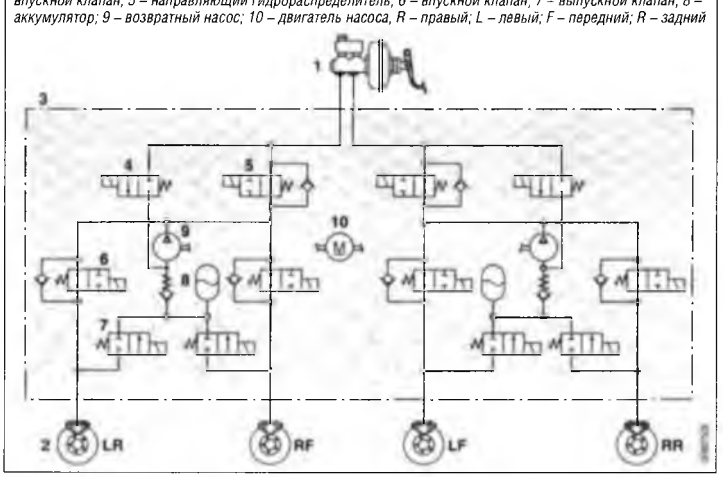
Когда буксуют оба колеса, то происходит вмешательство двигателя. Это имеет место, когда приводной момент оказывается выше максимального передаваемого момента на колесах. Вмешательство двигателя соответственно уменьшает приводной момент.

На грузовых и легковых автомобилях с дизельными двигателями оно выполняется в зависимости от варианта, с помощью электроники управления дизельным двигателем, ETC (электронное управление дроссельной заслонкой).

У легковых автомобилей с двигателями с искровым зажиганием уменьшение крутящего момента обычно выполняется путем комбинирования некоторых функций. Таким образом, можно уменьшить крутящий момент двигателя в соответствии с требованиями посредством специального подавления импульсов впрыска, задержки момента зажигания или перекрытия дроссельной заслонкой (ETC).

Системы управления двигателем получают запрос от TCS по сигнальному каналу или каналу передачи данных CAN.

***Рис. 3** Схема гидравлического контура ABS/TCS у легковых автомобилей с X-образной конфигурацией тормозных контуров:*
1 – главный тормозной цилиндр; 2 – рабочий цилиндр колесного тормоза; 3 – гидравлический блок; 4 – впускной клапан; 5 – направляющий гидрораспределитель, 6 – впускной клапан; 7 – выпускной клапан, 8 – аккумулятор; 9 – возвратный насос; 10 – двигатель насоса, R – правый; L – левый; F – передний; R – задний



Система динамической стабилизации

Функции

Причиной большого числа ДТП является человеческий фактор. Даже при обычных условиях движения водитель и автомобиль могут достигнуть своих физических пределов вследствие, к примеру, неожиданного поворота дороги, внезапно появившегося препятствия или непредвиденного изменения состояния дорожного покрытия. Увеличение скорости также может привести к потере водителем уверенного контроля над автомобилем, если силы поперечного ускорения, воздействующие на автомобиль, в такой ситуации достигнут уровня, требующего от водителя слишком больших усилий.

При резком изменении сцепления шин с дорогой автомобиль внезапно начинает вести себя не так, как ожидает водитель, исходя из своего опыта. В таких экстремальных ситуациях водитель зачастую уже не способен самостоятельно стабилизировать автомобиль; как правило, в состоянии паники он своими действиями лишь усугубляет потерю устойчивости. В результате образуется значительное расхождение между продольным движением автомобиля и его продольной осью (угол дрейфа β). Даже путем поворота рулевого колеса в противоположном направлении обычный водитель сможет самостоятельно восстановить устойчивость лишь при угле дрейфа не более 8°.

Система динамической стабилизации (ESP) – именно под этим названием компания Bosch вывела на рынок свою систему управления динамикой движения – вносит значительный вклад в преодоление таких ситуаций, помогая водителю сохранить управляемость автомобиля в физических рабочих пределах. Датчики постоянно фиксируют поведение и водителя, и автомобиля. Путем сравнения фактического состояния с заданным, подходящим к той или иной ситуации, в случае значительных расхождений система вмешивается в работу тормозной системы и силового агрегата для стабилизации автомобиля (рис. 1).

Встроенная функциональность антиблокировочной системы (ABS) предотвращает блокирование колес при нажатии на тормоз, в то время как аналогично интегрируемая система управления тяговым усилием (TCS) предотвращает пробуксовывание колес при трогании с места и разгоне. ESP – это комплексная система, охватывающая возможности, выходящие далеко за рамки ABS и комбинации ABS и TCS. Эта система предотвращает отклонение автомобиля от курса с заносом задней оси (избыточная поворачиваемость) или передней оси (недостаточная поворачиваемость), автомобиль слушается руля в рамках физически возможного.

Система ESP базируется на испытанных и зарекомендовавших себя компонентах систем



Рис. 1. Боковая динамическая реакция легкового автомобиля с ESP:
1 – водитель рулит, образование боковой силы;
2 – угроза потери устойчивости, вмешательство ESP спереди справа,
3 – автомобиль сохраняет управляемость;
4 – повторная угроза потери устойчивости из-за слишком интенсивного выруливания, вмешательство ESP спереди слева, полная стабилизация;
M_B – момент вращения автомобиля вокруг вертикальной оси,
F_R – силы на колесах, действующие в поперечном направлении;
β – угол дрейфа (отклонение направления движения от продольной оси автомобиля);
– тормозящее вмешательство ESP

ABS и TCS. Таким образом, можно активно тормозить воздействуя на отдельные колеса с высоким уровнем динамической реакции. На крутящий момент двигателя и, соответственно, тягу и пробуксовывание колес можно повлиять с помощью системы управления двигателем. Эти системы сообщаются между собой, к примеру, по шине CAN.

Таблица 1. Термины и условные обозначения величин

a_y	Измеренное поперечное ускорение автомобиля
F_x	Сила, действующая на шину в продольном направлении
F_y	Сила, действующая на шину в поперечном направлении (боковая сила)
F_N	Сила, действующая на шину в нормальном направлении (нормальная сила)
l	Расстояние между передней и задней осями
M_{BrNorm}	Номинальный тормозной момент
$M_{DifNorm}$	Номинальный момент дифференциала
$M_{EngNorm}$	Номинальный момент двигателя
$M_{MWhlNorm}$	Номинальный суммарный момент
$\Delta M_{ReqNorm}$	Приращение номинального момента двигателя
ΔM_z	Стабилизирующий момент вращения вокруг вертикальной оси
p_{Whl}	Давление в рабочем цилиндре тормозного механизма колеса
p_{Adm}	Давление на впуске
r	Радиус поворота
v_{ch}	Характеристическая скорость автомобиля
v_{Dif}	Разность скоростей приводных колес на одной оси
$v_{DifNorm}$	Номинальная разность скоростей приводных колес на одной оси
v_{MWhl}	Средняя скорость колес приводной оси
$v_{MWhlNorm}$	Номинальная средняя скорость колес
v_{Whl}	Измеренная скорость колеса
v_x	Продольная скорость автомобиля
v_y	Поперечная скорость автомобиля
α	Угол ввода шины
β	Угол дрейфа
δ	Угол поворота рулевого колеса
λ	Относительное скольжение шины
λ_{Norm}	Номинальная величина относительного скольжения шины на колесе i
$\Delta\lambda_{DifTolNorm}$	Номинальное изменение допустимой разности в относительном скольжении приводной оси (осей)
$\Delta\lambda_{So}$	Номинальное изменение относительного скольжения
μ	Коэффициент сцепления между шиной и дорожным покрытием
ψ	Скорость вращения вокруг вертикальной оси
ψ_{Norm}	Номинальная скорость вращения вокруг вертикальной оси

Требования

Система динамической стабилизации (ESP) помогает повысить безопасность дорожного движения. Она улучшает поведение автомобиля на дороге в рамках физически возможного. Реакция автомобиля остается предсказуемой для водителя, и автомобиль становится более управляемым в критических ситуациях.

В рамках физических возможностей автомобиля курсовая устойчивость автомобиля улучшается во всех состояниях – при полном и частичном торможении, движении накатом, разгоне, обгоне и изменениях нагрузки, а также, к примеру, в случае экстремальных маневров (при панической реакции). Значительно снижается риск заноса.

В ряде ситуаций эффективность торможения достигается путем использования тяговых характеристик при вмешательстве ABS и TCS, и когда активировано управление тяговым крутящим моментом двигателя (автоматическое увеличение оборотов двигателя для подавления избыточного тормозного момента двигателя). Это приводит к сокращению тормозного пути и увеличению тяги, улучшению устойчивости и повышению уровня чувствительности рулевого управления.

Некорректные вмешательства систем могут сказаться на безопасности. Комплексная концепция безопасности обеспечивает своевременное обнаружение всех неисправностей, которых не удается избежать, и система ESP полностью или частично отключается в зависимости от типа неисправности.

Многочисленные исследования (например, [1] и [2]) показали, что ESP значительно снижает количество ДТП, вызванных заносом, и уровень смертности в ДТП. Как следствие, оснащение автомобилей системой ESP стало обязательным в США и Канаде с сентября 2011 года. В Евросоюзе (ЕС), все новые легковые автомобили и легкие грузовики должны оснащаться системой ESP с ноября 2011 года (неотъемлемая часть ECE-R 13H). Для остальных новых автомобилей установлен переходный период до конца 2014 года. В других регионах, например, в Японии и Австралии, также будут вводиться такие требования.

Принцип действия

Система динамической стабилизации (ESP) использует тормозную систему автомобиля и силовой агрегат для коррекции продольного и поперечного движения автомобиля в критических ситуациях. Когда подключается система динамической стабилизации, она смещает приоритеты управления тормозной системой. Основная функция колесных тормозов – замедление и/или остановка автомобиля – становится вторичной по важности, поскольку происходит вмешательство ESP для сохранения курсовой устойчивости автомобиля. ESP может также ускорять приводные колеса путем вмешательства в работу двигателя, повышая устойчивость.

Оба механизма воздействуют на движение автомобиля. При движении по окружности в устойчивом состоянии существует определенная связь между усилиями на рулевом колесе и результирующим поперечным ускорением автомобиля и, соответственно, силами на шинах в поперечном направлении (эффект подруливания). Силы, воздействующие на шину в продольном и поперечном направлениях, зависят от пробуксовки шины. Это означает, что на движение автомобиля можно повлиять через скольжение шин. Торможение отдельных колес, например, заднего колеса на внутреннем радиусе поворота в случае недостаточной поворачиваемости или переднего колеса на внешнем радиусе поворота в случае избыточной поворачиваемости помогает как можно более точно выдержать заданную траекторию движения автомобиля.

Типичный маневр

Чтобы сравнить, как автомобиль будет вести себя в экстремальной ситуации с ESP и без ESP, рассмотрим следующий пример. Маневр движения отражает текущую ситуацию и базируется на программах моделирования, разработанных на основе результатов испытаний. Результаты были подтверждены последующими дорожными испытаниями.

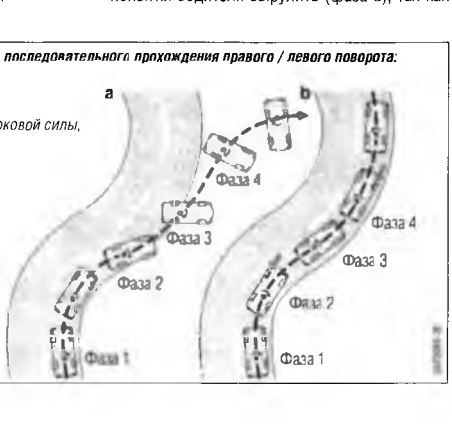
Быстрое маневрирование и выруливание

На рис. 2 изображена реакция автомобиля без ESP и автомобиля с ESP при прохождении серии S-образных участков с быстрым маневрированием и выруливанием на дороге с высоким коэффициентом сцепления шин с дорогой (μ = 1), без притормаживания и на исходной скорости 144 км/ч. На рис. 3 изображены кривые параметров динамической реакции. В начале, при приближении к S-образному участку, условия для обоих автомобилей и их реакции идентичны. Затем водители начинают маневрировать (фаза 1).

Автомобиль без ESP

Как видно из рисунка, после начальной фазы резкое маневрирование у автомобиля без ESP уже угрожает потерей управляемости (рис. 2, а, фаза 2) В то время как вращение руля быстро создало значительные поперечные силы на передних колесах, имеет место определенная задержка создания аналогичных сил на задних колесах. Автомобиль реагирует вращением по часовой стрелке вокруг своей вертикальной оси. Он лишь реагирует на попытки водителя вырулить (фаза 3), так как

Рис. 2. Курсовая устойчивость во время последовательного прохождения правого / левого поворота:
a – автомобиль без ESP;
b – автомобиль с ESP;
||||||| – тормозящее вмешательство ESP;
фаза 1: водитель рулит, образование боковой силы,
фаза 2: угроза потери устойчивости,
фаза 3: выруливание – автомобиль без ESP теряет управляемость, автомобиль с ESP остается управляемым,
фаза 4: автомобиль без ESP потерял управляемость; автомобиль с ESP полностью стабилизирован вмешательством ESP на правом переднем колесе

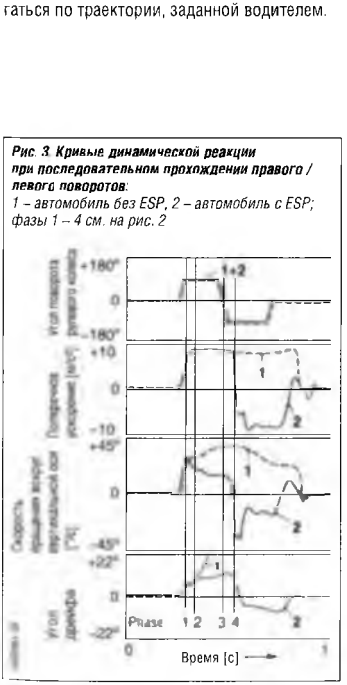


уже потерял управляемость. Резко возрастают скорость рыскания и угол бокового увода, и автомобиль срывается в занос (фаза 4).

Автомобиль с ESP

Автомобиль с ESP стабилизируется после первоначального маневрирования путем активного торможения переднего левого колеса для устранения угрозы потери устойчивости (рис. 2, b, фаза 2): это происходит без вмешательства водителя. Это действие ограничивает занос внутрь, уменьшая скорость рыскания и стабилизируя угол разворота при движении по инерции. После изменения направления поворота, свое направление сначала меняет момент, и затем – скорость вращения вокруг вертикальной оси (между фазами 3 и 4). В фазе 4, второе короткое нажатие на тормоз, на этот раз правого переднего колеса – полностью восстанавливает устойчивость. Автомобиль продолжает двигаться по траектории, заданной водителем.

Рис. 3. Кривые динамической реакции при последовательном прохождении правого / левого поворотов:
1 – автомобиль без ESP, 2 – автомобиль с ESP; фазы 1 – 4 см. на рис. 2



Структура системы

Цель системы управления динамикой

Контроль характеристик управляемости в пределах физически возможного направлен на то, чтобы сохранить три степени свободы автомобиля в плоскости дороги – линейную скорость v_x, поперечную скорость v_y и скорость ψ вращения вокруг вертикальной оси – в контролируемых пределах. Задуманный водителем маневр преобразуется в динамическую реакцию автомобиля, адаптируемую к характеристикам дороги в рамках процесса оптимизации, нацеленного на обеспечение максимальной безопасности.

Структура системы и управления

Система ESP состоит из автомобиля как управляемой системы, датчиков, определяющих вводные переменные, исполнительных органов для коррекции тормозных, движущих и поперечных сил, а также иерархически структурированных контроллеров – контроллера поперечной динамики (высший уровень) и контроллеров колес (низший уровень) (рис. 4). Контроллер высшего уровня определяет заданные значения для контроллеров низшего уровня в виде моментов или скольжения или их изменений. Внутренние системные переменные, не измеряемые напрямую, такие как угол дрейфа β, определяются при оценке условий движения.

Чтобы определить номинальное поведение, анализируются сигналы, соответствующие командам водителя. Оцениваются сигналы от датчика положения рулевого колеса, датчика давления в тормозной системе (желаемое замедление, получаемое из тормозного давления, измеренного в гидравлическом блоке) и положения педали акселератора (желаемый крутящий момент двигателя). При вычислении номинального поведения также учитывается используемый потенциал коэффициента сцепления шин с дорогой и скорость автомобиля. Эти параметры оцениваются на основе сигналов, получаемых от датчиков частоты вращения колес, датчика поперечного ускорения, датчика скорости вращения вокруг вертикальной оси и датчика давления в тормозной системе. Затем вычисляется момент относительно вертикальной оси, который необходим для приближенного приведения параметров действительного состояния к параметрам требуемого состояния.

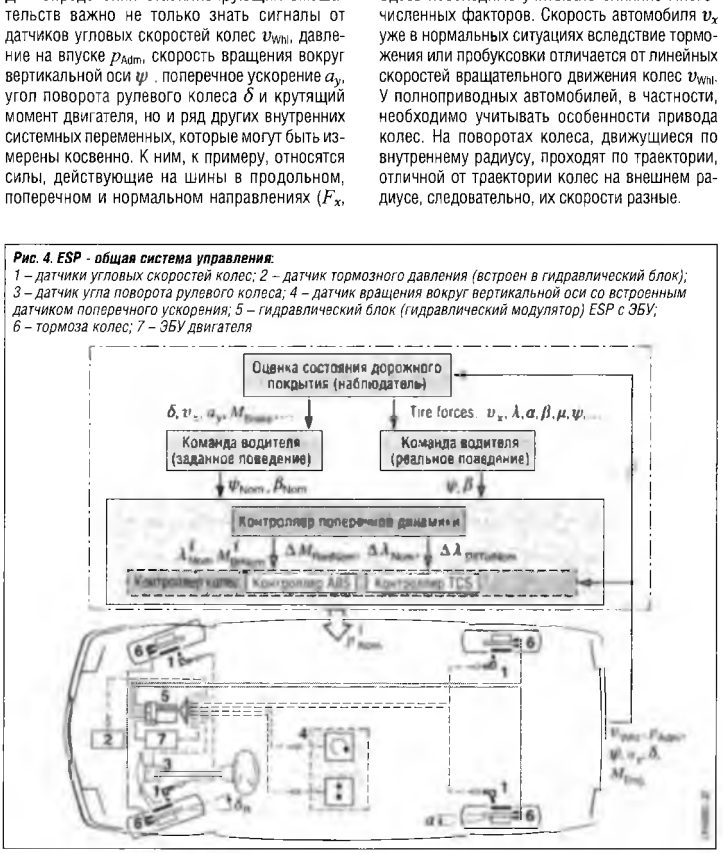
В целях получения требуемого момента рыскания необходимо, чтобы изменения в величинах тормозного момента и относительного скольжения колес определялись посредством контроллера ESP. Эти величины затем устанавливаются контроллерами низшего уровня – контроллерами относительного скольжения и тягового усилия с помощью исполнительного механизма гидравлической тормозной системы и привода управления работой двигателя.

Оценка состояния движения

Для определения стабилизирующих вмешательств важно не только знать сигналы от датчиков угловых скоростей колес v_{Whl}, давление на впуске p_{Adm}, скорость вращения вокруг вертикальной оси ψ , поперечное ускорение a_y, угол поворота рулевого колеса δ и крутящий момент двигателя, но и ряд других внутренних системных переменных, которые могут быть измерены косвенно. К ним, к примеру, относятся силы, действующие на шины в продольном, поперечном и нормальном направлениях (F_x, F_y и F_N), линейная скорость v_x, значения относительного скольжения шин λ_t, угол бокового увода колес α на одной оси, угол дрейфа β, поперечная скорость автомобиля v_y и коэффициент сцепления μ. Они определяются по сигналам датчиков на базе вычислительных моделей.

Линейная скорость автомобиля v_x имеет ключевую важность для всех контроллеров бокового увода колес и поэтому должна вычисляться с очень большой точностью. Это делается на основе автомобильной модели с использованием измеренных угловых скоростей колес. Здесь необходимо учитывать влияние многочисленных факторов. Скорость автомобиля v_x уже в нормальных ситуациях вследствие торможения или пробуксовки отличается от линейных скоростей вращательного движения колес v_{Whl}. У полноприводных автомобилей, в частности, необходимо учитывать особенности привода колес. На поворотах колеса, движущиеся по внутреннему радиусу, проходят по траектории, отличной от траектории колес на внешнем радиусе, следовательно, их скорости разные.

Рис. 4. ESP - общая система управления:
1 – датчики угловых скоростей колес; 2 – датчик тормозного давления (встроен в гидравлический блок); 3 – датчик угла поворота рулевого колеса; 4 – датчик вращения вокруг вертикальной оси со встроенным датчиком поперечного ускорения; 5 – гидравлический блок (гидравлический модулятор) ESP с ЭБУ; 6 – тормоза колес; 7 – ЭБУ двигателя



Управляемость автомобиля меняется при обычной эксплуатации в ответ на изменения нагрузки, сопротивления движению (например, уклон дороги или изменение типа покрытия, ветер) или износ (например, тормозных колодок).

При всех этих граничных условиях линейная скорость автомобиля должна оцениваться с отклонением в несколько процентов для обеспечения стабилизирующего вмешательства в необходимой степени.

Контроллер поперечной динамики

Задачей контроллера поперечной динамики является вычисление фактического поведения автомобиля на основании, например, сигнала скорости вращения вокруг вертикальной оси и угла дрейфа, и сделать поведение автомобиля в экстремальной по динамике ситуации как можно более близким к поведению в обычной ситуации (номинальное поведение).

Связь, существующая при движении по окружности в устойчивом состоянии между скоростью вращения вокруг вертикальной оси и углом поворота рулевого колеса δ, линейной скоростью автомобиля v_x и характеристическими переменными, используется для определения номинального поведения. Применяя одноколейную модель (см. например, [3]), получаем:

$$\psi = \frac{v_x}{l}\,\delta\,\frac{1}{1+\left(\frac{v_x}{v_{ch}}\right)^2}$$

в качестве базы для расчета номинального движения автомобиля. В этой формуле l означает расстояние между передней и задней осями. Геометрические и физические параметры модели автомобиля обобщены в «характеристической скорости автомобиля» v_{ch}.

В этом случае переменная ψ ограничивается соответственно текущим коэффициентам скольжения и конкретными свойствами динамики автомобиля и ситуации движения (инициируемые водителем торможение или разгон) и такими условиями, как наличие уклона или различие в коэффициентах скольжения (μ-разделение). Таким образом, команда водителя известна как номинальная скорость вращения вокруг вертикальной оси $\dot{\psi}_{Nom}$.

Контроллер поперечной динамики сравнивает измеренную скорость вращения вокруг вертикальной оси с номинальной и в случае значительных отклонений вычисляет момент вращения вокруг вертикальной оси, необходимый для совпадения переменной величины фактического состояния с номинальным значением. На более высоком уровне контролируется угол дрейфа β и по мере роста значений все в большей степени учитывается в расчете стабилизирующего момента вращения вокруг вертикальной оси ΔM_z. Эта выходная переменная контроллера применяется посредством входных переменных тормозного момента и проскальзывания отдельных колес, корректируемых контроллерами нижнего уровня.

Стабилизирующие вмешательства выполняются на всех колесах, торможение которых генерирует момент вращения вокруг вертикальной оси в требуемом направлении вращения, и на которых еще не достигнут предел передаваемых сил. У автомобиля с избыточной поворачиваемостью физический предел сначала превышается на задней оси. Поэтому стабилизирующие вмешательства выполняются на переднем мосту. У автомобиля с недостаточной поворачиваемостью ситуация обратная (см. например, [6]).

Номинальные значения относительного скольжения λ_{Nom}, запрашиваемые контроллером поперечной динамики, на отдельных колесах устанавливаются с помощью контроллеров колес, т.е. контроллеров низшего уровня (см. рис. 4). Различают следующие три случая.

Управление колесами при движении накатом

Чтобы создавать как можно более точные величины момента вращения вокруг вертикальной оси, необходимые для стабилизации автомобиля, силы на колесах должны изменяться при определенных условиях путем контроля проскальзывания колес. Номинальная величина проскальзывания, запрашиваемая контроллером поперечной динамики на том или ином колесе в случае отсутствия торможения регулируется контроллером проскальзывания путем активного нагнетания давления. Для этого нужно как можно более точно знать величину текущего проскальзывания колеса. Оно вычисляется на основе сигнала измеренной скорости колеса и линейной скорости автомобиля v_x. Номинальный тормозной момент на колесе образуется из отклонения фактической величины проскальзывания от номинальной с использованием PID-регулирования (пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования).

Колесо может подвергаться торможению не только в случае активного нагнетания давления контроллером поперечной динамики. После переключения на пониженную передачу

и резком отпускании педали газа инерция движущихся деталей двигателя в определенной степени тормозит приводные колеса. При увеличении этой силы и соответствующего реактивного момента сверх определенного уровня шины теряют способность передавать результирующие нагрузки на дорогу и у них появляется тенденция к блокированию (например, из-за внезапного наезда на скользкий участок дороги). Тормозное проскальзывание приводных колес можно ограничить в случае движения накатом посредством регулировки тормозного момента двигателя. Водителем это воспринимается как «плавный разгон».

Управление колесами при торможении

При торможении на отдельных колесах выполняются различные операции, в зависимости от ситуации:

- вмешательство водителя через нажатие педали тормоза и вращение рулевого колеса;
- эффект контроллера ABS, предотвращающего блокировку отдельных колес;
- вмешательства контроллера поперечной динамики, обеспечивающие устойчивость автомобиля за счет подтормаживания отдельных колес, при необходимости.

Эти три требования должны координироваться таким образом, чтобы инициируемые водителем торможение и маневрирование реализовывались как можно полнее. Если управление колесами выполняется главным образом с целью максимального замедления автомобиля, то его можно выполнять на основании ускорения колес, надежно определяемого по минимальной информации датчиков (управление неустойчивостью). Для регулировки продольных и поперечных сил на шине для стабилизации автомобиля необходимо применять принцип управления проскальзывания [4], так как он также позволяет управлять колесами в нестабильном диапазоне характеристики коэффициента сцепления / проскальзывания. Однако на основании имеющихся сигналов датчиков должна определяться абсолютная величина проскальзывания колеса до нескольких процентов, в зависимости от скорости автомобиля.

Задача контроллера ABS – обеспечить устойчивость и управляемость автомобиля в любых дорожных условиях и использование сцепления между шинами и дорогой в как можно большей степени. Будучи контроллером нижнего уровня по отношению к контроллеру поперечной динамики, он выполняет эти функции путем модулирования тормозного давления на колесе таким образом, чтобы обеспечивалась максимально возможная продольная сила при сохранении достаточной поперечной устойчивости. Однако в ESP измеряется больше переменных, чем в ABS, имеющей только датчики угловых скоростей колес. Таким образом, информация о движении колеса, такая как скорость вращения вокруг вертикальной оси или поперечное ускорение, получается путем прямого измерения с большей точностью, чем при модельной оценке на основании нескольких измеренных значений.

В определенных ситуациях можно повысить эффективность системы путем адаптации управления ABS посредством использования переменных из контроллера поперечной динамики. Когда автомобиль тормозит на неровной дороге (μ-разделение), на левых и правых колесах возникают очень разные тормозные силы. В результате возникает момент вращения вокруг вертикальной оси, на который водитель должен реагировать выруливанием, чтобы стабилизировать автомобиль. Скорость нарастания этого момента и быстрота последующей реакции водителя зависят от момента инерции автомобиля вокруг вертикальной оси. ABS вызывает задержку увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси, сдерживая рост давления в колесном цилиндре переднего колеса с более высоким коэффициентом сцепления с дорожным покрытием. Эта функция ABS может также использовать информацию контроллера высшего уровня – контроллера поперечной динамики (по реакции водителя и поведению автомобиля) и, соответственно, даже еще лучше реагировать на фактическое движение автомобиля.

Если при торможении в повороте автомобиль при определенных условиях начинает поворачиваться, то тенденции к избыточной поворачиваемости можно противодействовать путем электронного распределения тормозных сил через уменьшение давления на отдельных колесах. Если этого недостаточно, то помогает контроллер поперечной динамики путем активного нагнетания давления на переднем колесе, движущемся по внешнему радиусу поворота (уменьшение поперечной силы). При недостаточной же поворачиваемости тормозной момент увеличивается на заднем колесе, движущемся по внутреннему радиусу поворота (при условии, что колесо не контролируется системой ABS) и слегка уменьшается на переднем внешнем колесе.

Если у автомобиля появляется тенденция к избыточной поворачиваемости при смене полосы с полным или частичным торможением, то уменьшается давление на заднем внешнем

колесе (увеличение поперечной силы), и увеличивается давление на переднем внешнем колесе (уменьшение поперечной силы). При недостаточной поворачиваемости при торможении в повороте увеличивается тормозной момент в заднем колесе, движущемся по внутреннему радиусу поворота (при условии, что колесо еще не попало в диапазон вмешательства ABS) и слегка уменьшается на переднем внешнем колесе.

Управление колесами при активном движении

Как только приводные колеса начинают проскальзывать при активном движении, активируется контроллер низшего уровня – контроллер тягового усилия (TCS). На измеренную скорость колеса и соответствующее проскальзывания можно повлиять путем изменения баланса крутящего момента на каждом приводном колесе. Контроллер TCS ограничивает крутящий момент на каждом колесе до величины, которая может быть передана на дорогу. Таким образом, команда водителя реализуется после разгона настолько, насколько это физически возможно, и одновременно обеспечивается фундаментальная курсовая устойчивость, так как слишком сильно уменьшаются боковые силы на колесе.

У автомобиля с активной осью в качестве регулирующих переменных используются средняя скорость колеса приводной оси.

$$v_{MWhl} = \frac{1}{2}\left(v^{l}_{Whl} + v^{r}_{Whl}\right)$$

и разность скоростей

$$v_{Dif} = v^{l}_{Whl} - v^{r}_{Whl}$$

между левым v^{l}_{Whl} и правым v^{r}_{Whl} колесами.

Структура контроллера TCS изображена на рис. 5. Опорные переменные контроллера поперечной динамики включаются в расчет номинального значения средней скорости колеса и разности скоростей колес, а также номинальных значений относительного скольжения и скоростей колес при движении накатом. При расчете номинальных значений v_{DifNom} (номинальной разности скоростей приводных колес на одной оси) и $v_{MWhlNom}$ (номинальной средней скорости колес), вводные переменные для изменения номинального относительного скольжения $\Delta\lambda_{Nom}$ и допустимая разность величин относительного скольжения $\Delta\lambda_{DifTolNom}$ приводной оси или осей корректируют базовые значения, вычисленные блоком TCS. Кроме того, тенденция к недостаточной или избыточной поворачиваемости, выявляемая контроллером поперечной динамики, через приращение номинального крутящего момента двигателя ΔM_{RedNom} напрямую влияет на определение максимально допустимого приводного момента.

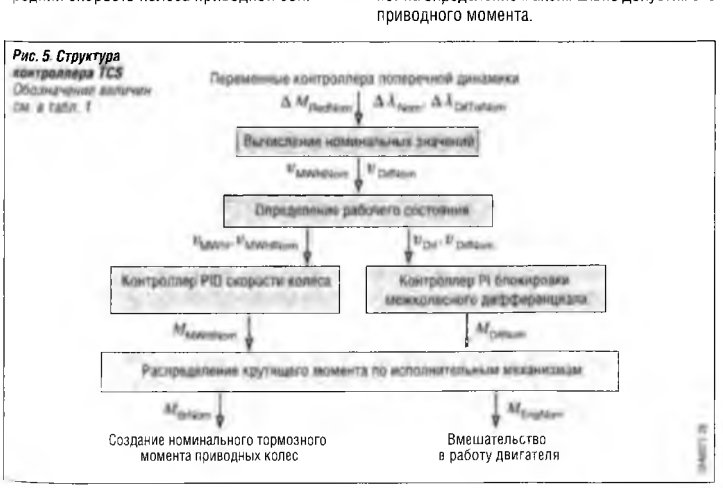


Рис. 5. Структура контроллера TCS
Обозначение величин см. в табл. 1

Динамическая реакция силового агрегата зависит от сильно изменяющихся режимов работы. Поэтому необходимо определить текущий режим работы (выбранная передача, включение сцепления), чтобы можно было адаптировать параметры контроллера к динамической реакции регулируемой системы и к не линейным характеристикам.

Поскольку на среднюю угловую скорость колеса влияют переменные инерционные силы, возникающие в приводе в целом (в двигателе, трансмиссии, на ведущих колесах, на карданном валу), то для описания её относительно медленной скорости динамической реакции используется относительно большая постоянная времени. Среднюю угловую скорость колеса контролирует нелинейный PID-контроллер, при этом, в частности, приращение I-компонента (в зависимости от режима работы) может варьироваться в широком спектре. В стационарном случае I-компонент является мерой крутящего момента, который может быть передан на колесо в точке контакта с поверхностью дороги. Выходной переменной этого контроллера является номинальный суммарный момент $M_{MWhlNom}$.

И наоборот, постоянная времени для разности скоростей колес относительно мала и отражает тот факт, что собственные инерционные силы колес являются практически единственным определяющим фактором для динамической реакции. Кроме того, в отличие от средней скорости колес, двигатель влияет на неё лишь косвенно. Разность скоростей колес v_{Dif} контролируется нелинейным PI-контроллером. Поскольку притормаживания приводного колеса вначале становятся заметными только через баланс крутящих моментов этого колеса, то они изменяют распределение межколесного дифференциала, имитируя его блокировку. Параметры этого контроллера блокировки межколесного дифференциала лишь в минимальной степени зависят от включенной передачи и влияний двигателя. Если дифференциальная скорость на приводной оси отличается от номинальной $v_{Dif Nom}$ больше, чем это допустимо («мертвая зона»), то запускается вычисление номинального дифференциального момента M_{DifNom}. «Мертвая зона» расширяется, если тормозных вмешательств TCS необходимо избегать, например, при прохождении поворотов на пределах возможностей.

Номинальный суммарный и номинальный дифференциальный крутящие моменты являются основой для распределения позиционирующих сил между исполнительными механизмами. Номинальный дифференциальный момент M_{DifNom} задается разностью между крутящими моментами на левом и правом ведущих колесах путем активации соответствующего клапана в гидравлическом блоке (ассиметричное вмешательство тормозов). Номинальный суммарный момент $M_{MWhlNom}$ регулируется как вмешательствами двигателя, так и симметричным вмешательством тормозов.

У бензинового двигателя регулировки, предпринимаемые через дроссельный клапан, относительно медленно дают эффект (задержка и переходная реакция двигателя). Для быстрого вмешательства через двигатель используются задержка момента зажигания и еще одна опция - селективное подавление импульсов впрыска. В дизельных двигателях электронный блок управления (EDC) уменьшает крутящий момент двигателя путем изменения количества впрыскиваемого топлива. Для краткосрочной помощи в уменьшении крутящего момента двигателя можно применять симметричное тормозное воздействие.

Во внедорожных условиях особую роль играет тяговое усилие. Обычно у внедорожников управление тяговым усилием автоматически адаптируется путем идентификации ситуации для достижения наилучших уровней эффективности и надежности. Другие автопроизводители дают водителю возможность выбрать различные регулировки, от деактивации ограничения крутящего момента двигателя до адаптации к особым состояниям дороги (лед, снег, трава, песок, снежная каша, каменистый грунт).

Дополнительные функции поперечной динамики

Описанные выше базовые функции ESP могут также включать в себя дополнительные функции поперечной динамики для особых категорий автомобилей, таких как полноприводные универсалы или внедорожники (SUV) и легкие фургоны, а также для особых требований к стабилизации автомобилей.

Расширенное управление недостаточной поворачиваемостью

Даже в нормальных условиях движения автомобиль может оказаться неспособным адекватно реагировать на вращение рулевого колеса (с образованием недостаточной поворачиваемости), если, к примеру, на повороте дорожное покрытие внезапно окажется мокрым или грязным. ESP может увеличить скорость вращения автомобиля вокруг вертикальной оси, создав дополнительный момент вращения. Это

позволяет автомобилю пройти поворот с физически возможной максимальной скоростью. Ожидаемая частота вмешательств и требования к комфорту у разных типов автомобилей разные и поэтому имеются соответственно разные ступени расширения для выполнения таких тормозных вмешательств, которые влияют на поведение автомобиля при недостаточной поворачиваемости.

Если водитель захочет пройти поворот по меньшему радиусу, чем это физически возможно, то останется лишь уменьшение скорости автомобиля. Эту информацию можно считывать во время поворота в устойчивом состоянии по зависимости между радиусом поворота r, линейной скоростью автомобиля v_x и скоростью вращения вокруг вертикальной оси $\dot{\psi}$:

$$r = \frac{v_x}{\dot{\psi}}.$$

Чтобы автомобиль оставался на заданной траектории, он – без применения момента вращения вокруг вертикальной оси – тормозится настолько, насколько это необходимо путем торможения всех колес (расширенное управление недостаточной поворачиваемостью, EUC).

Предотвращение опрокидывания

Легкие грузовики и другие автомобили с высоким центром тяжести, такие как внедорожники (SUV), могут перевернуться при возникновении больших поперечных сил, например, из-за резкого руления при маневрах уклонения от препятствия на сухой дороге (очень динамичные ситуации вождения) или при медленном увеличении поперечного ускорения автомобиля до критического при съезде с автострады с уменьшающимся радиусом поворота на слишком высокой скорости (почти стационарные ситуации вождения).

Существуют особые функции (функции подавления опрокидывания, RMF), выявляющие эти критические ситуации с помощью обычных датчиков ESP и стабилизирующих автомобиль путем вмешательства в работу тормозной системы и двигателя. Для обеспечения своевременного вмешательства, в дополнение к маневрирующим действиям водителя и измеренной реакции автомобиля (скорость вращения вокруг вертикальной оси и боковое ускорение), для оценки поведения автомобиля в ближайшем будущем используется прогнозирующая модель. В частности, при выявлении надвигающейся опасности опрокидывания притормаживаются два колеса на внешнем радиусе поворота. Это действие уменьшает поперечные силы на колесах и, соответственно, критическое поперечное ускорение. Управление колесами должно выполняться с таким высоким уровнем чувствительности, чтобы, несмотря на сильно колеблющиеся вертикальные силы F_N, управляемость не ухудшалась из-за тенденции к блокированию отдельных колес, особенно при очень динамичных маневрах уклонения. Уменьшение скоростей колес при притормаживании отдельных колес также помогает водителю удержать автомобиль на своей полосе. В почти стационарных ситуациях движения точно выверенное уменьшение крутящего момента двигателя также не позволяет водителю спровоцировать критическую ситуацию.

Момент стабилизирующего вмешательства и его интенсивность должны быть как можно точнее адаптированы к текущему поведению автомобиля. Это поведение может значительно изменяться с нагрузкой, к примеру, в случае с легкими фургонами и внедорожниками с багажниками на крыше. Такие автомобили используют дополнительные оценочные алгоритмы, вычисляющие массу автомобиля и изменение центра тяжести, вызванное распределением нагрузки, если это требуется для адаптации функций ESP (управление с адаптацией к нагрузке, LAC).

Подавление раскачивания прицепа

В зависимости от скорости движения автомобили с прицепом подвержены раскачиванию вокруг вертикальной оси. Если автомобиль с прицепом или автопоезд движется со скоростью меньшей «критической» (обычно 90 км/ч и 130 км/ч), эти раскачивающие движения адекватно и быстро гасятся. Но если скорость оказывается выше, то небольшие повороты руля, боковой ветер или наезд на выбоину могут внезапно вызвать такие раскачивающие движения, которые быстро набирают интенсивность и в конечном счете могут привести к ДТП из-за складывания автопоезда.

Периодическая избыточная поворачиваемость вызывает стандартные стабилизирующие вмешательства ESP, но они обычно приходят поздно и сами по себе не способны стабилизировать автопоезд. Функция подавления раскачивания прицепа (TSM) своевременно выявляет раскачивающие движения на основе сигналов стандартных датчиков ESP; это делается посредством анализа скорости

вращения тягача вокруг вертикальной оси на основе моделей, с учетом маневрирующих движений водителя. Когда эти раскачивающие движения достигают критического уровня, автопоезд автоматически тормозится для уменьшения скорости до такой степени, чтобы даже малейшее последующее возбуждение не вызвало немедленных критических колебаний. Чтобы как можно эффективнее погасить колебания в критической ситуации, в дополнение к симметричному торможению через все оси тягача выполняются притормаживания отдельных колес, быстро устраняющие раскачивание автопоезда. Ограничение крутящего момента двигателя предотвращает опасное ускорение автомобиля (инициируемое водителем) во время стабилизации.

Активация других исполнительных органов ESP

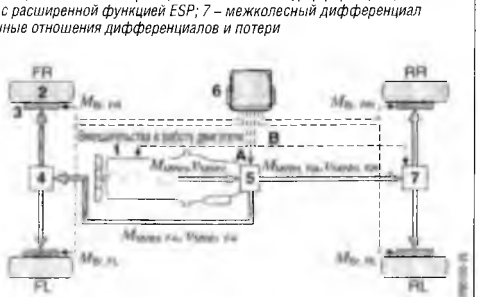
Наряду с использованием гидравлических колесных тормозов, предусмотрены и другие исполнительные механизмы, посредством которых можно влиять на динамику движения автомобиля. Когда активное рулевое управление и системы шасси соединяются с ESP, образуя комплексную систему – систему управления динамикой автомобиля (Vehicle Dynamics Management, VDM), они в комплексе могут даже лучше поддержать водителя, что еще больше повышает безопасность движения и динамику вождения.

В то время как сочетание системы стабилизации рулевого управления с тормозной системой появилось в последние несколько лет [5], системы для активации блокировки дифференциала в трансмиссии уже давно представлены на рынке. Большое количество таких систем означает, что соединение с ESP возможно во многих случаях. Дополнительный исполнительный механизм может быть активирован либо непосредственно из расширенной функции ESP (принцип взаимодействия), либо через отдельный ЭБУ, обменивающийся информацией с ЭБУ ESP (параллельный принцип).

В полноприводных автомобилях создаваемый двигателем момент распределяется между обеими осями через межосевой дифференциал (рис. 6). Когда двигатель сначала приводит в действие одну ось, а другая ось соединена с двигателем через межосевой дифференциал, такая система называется зависимой. Если этот межосевой дифференциал представляет собой разомкнутый дифференциал (без блокировки), то приводной момент ограничивается при увеличении пробуксовки одной оси. В самом неблагоприятном случае при пробуксовке колеса не происходит движения вперед. В сочетании с ESP симметричные вмешательства торможением контроллера TCS на все колеса могут ограничить межосевую разность скоростей колес и тем самым добиться продольного блокирующего эффекта.

Управление тяговым усилием системы ESP может также сопоставляться с особыми принципами работы других типов межосевых дифференциалов, таких как Torsen и вязкие муфты. В принципе, все управляемые исполнительные механизмы привода должны иметь определенный блокирующий момент и динамическую реакцию при размыкании и смыкании, чтобы адаптировать к себе подруливающие свойства автомобиля.

Рис. 6. Концепция полноприводного автомобиля с ESP:
1 – двигатель и трансмиссия, 2 – колесо; 3 – колесный тормоз; 4 – межколесный дифференциал; 5 – межосевой дифференциал; 6 – ЭБУ с расширенной функцией ESP; 7 – межколесный дифференциал
Двигатель и трансмиссия, передаточные отношения дифференциалов и потери скомбинированы в одном блоке.
A – блокировка с активным межосевым дифференциалом,
B – вмешательства с векторизацией момента,
v – скорость колеса,
v_{MWhl} – средняя скорость колеса,
M_{MWhl} – суммарный момент,
M_{Bi} – тормозной момент,
R – правый, L – левый,
F – передний, R – задний



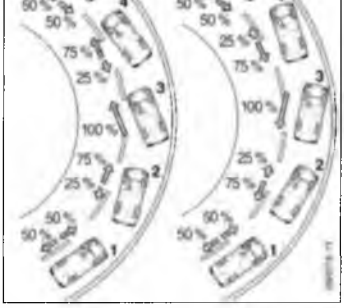
Если привод автомобиля может быть вручную переключен в различные режимы, то ESP может автоматически подстроиться под выбранный водителем режим. Поскольку ESP базируется на индивидуальном управлении колесами, то взаимодействие с механическими блокировками дифференциала для езды по бездорожью возможно лишь при возможности автоматического размыкания блокировки дифференциала во время вмешательств контроллера поперечной динамики. В противном случае систему необходимо переключить на аварийный режим ABS, когда включена блокировка, потому что вмешательства системы динамической стабилизации на одном колесе затронут и другие колеса, если оси жёстко соединены.

Наряду с простыми соединениями между двумя осями, имеются управляемые блокираторы межосевого дифференциала, в которых электрический или гидравлический исполнительный орган активирует муфту, тем самым адаптируя момент блокировки (рис. 6, A). Таким образом, на основании информации ESP (скорости колес, скорость автомобиля, скорость вращения вокруг вертикальной оси, боковое ускорение и крутящий момент двигателя), и с учетом переменных, специфичных для исполнительного органа (таких как механическая нагрузка) можно оптимально адаптировать соотношение двух осей к текущей ситуации движения (динамический крутящий момент при межосевом распределении, DCT-C).

Пример на рис. 7 показывает, как переменное распределение приводного момента влияет на поведение автомобиля. Если в случае риска избыточной поворачиваемости при прохождении поворота можно временно перебросить часть крутящего момента на переднюю ось, это необходимо делать лишь намного позже во избежание потери устойчивости, для уменьшения крутящего момента двигателя или даже стабилизации автомобиля вмешательством тормозной системы (показано максимально возможное перераспределение крутящего момента привода). Если автомобиль имеет тенденцию к недостаточной поворачиваемости, то её можно уменьшить путем смещения крутящего момента на заднюю ось. В обоих случаях достигается улучшение реакции автомобиля и повышение устойчивости. Пределы, в которых фактически возможно смещение крутящего момента привода, зависят от конфигурации конкретного привода.

Управляемый межклесный дифференциал на одной оси может быть активирован системой ESP по аналогичным линиям к гибкому соединению двух осей. В плане принципа работы система динамического распределения крутящего момента на колеса (Dynamic Wheel Torque Distribution, DWT) отличается лишь от блокировки межколесного дифференциала, выполняемой системой TCS через гидравлические колесные тормоза. Однако такой дополнительный исполнительный орган в обычных ситуациях также активно распределяет момент привода между колесами одной оси. Это делается с минимальными потерями и с гораздо большей чувствительностью и комфортом, чем может быть достигнуто через управление тяговым усилием в сочетании с регулированием тормозного момента и уменьшением крутящего момента двигателя, учитывая износ гидравлического блока ESP.

Рис. 7. Влияние распределения момента привода на поведение автомобиля:
a – избыточная поворачиваемость: сначала порог устойчивости превышается на задней оси; b – недостаточная поворачиваемость: сначала порог устойчивости превышается на передней оси; 1 – стандартное распределение при устойчивом движении; 2 – угроза потери устойчивости, смещение момента на ось, все еще имеющую потенциал устойчивости; 3 – максимальное смещение приводного момента; 4 – отмена смещения, 5 – стандартное распределение восстанавливается после уменьшения неустойчивости



Компоненты программы

Гидравлический блок, непосредственно подключенный к нему ЭБУ (добавочный ЭБУ) и датчики скорости работают в сложных условиях моторного отсека и колесных арок. Датчик вращения вокруг вертикальной оси и датчик бокового ускорения либо встраиваются в ЭБУ, либо, как датчик угла поворота, устанавливаются в салоне. На рис. 8 показаны примерные места установки компонентов в автомобиле с электрическими и механическими соединениями.

Электронный блок управления

ЭБУ в виде печатной платы включает в себя, как и компьютер с двухъядерным процессором, все приводы и полупроводниковые реле для активации клапанов и насосов, а также интерфейсные контуры для обработки сигналов датчиков и соответствующие коммутирующие входы для дополнительных сигналов (например, выключатель стоп-сигнала). Имеются также интерфейсы (CAN, FlexRay) для сообщения с другими системами, такими как системы управления двигателем и трансмиссией.

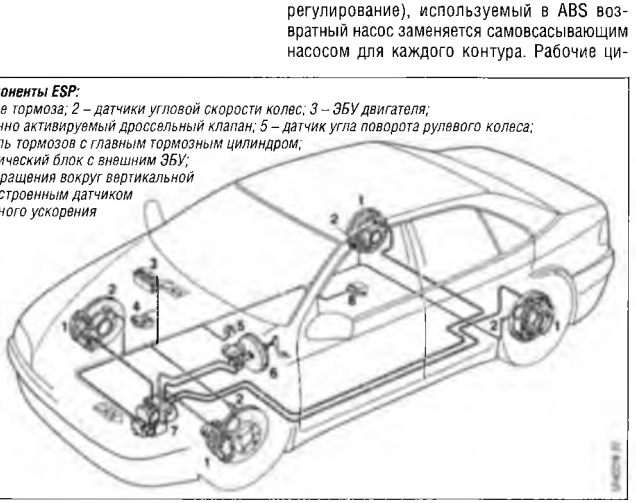
Гидравлический блок

Гидравлический блок (также называемый гидравлическим модулятором), как в системах ABS или ABS/TCS, образует гидравлическое соединение между главным тормозным цилиндром и рабочими цилиндрами колесных тормозов. Он преобразует управляющие команды ЭБУ и через электромагнитные клапаны регулирует давление в колесных тормозах. Гидравлический контур выполняется в виде каналов в алюминиевом блоке. Этот блок также используется для размещения необходимых элементов гидравлической функции (электромагнитных клапанов, плунжерных насосов и камер-аккумуляторов).

В системе ESP должно быть 12 клапанов независимо от конфигурации тормозных контуров (рис. 9). Кроме того, обычно встраивается датчик давления, измеряющий инициируемое водителем замедление через тормозное давление в главном тормозном цилиндре. Это повышает эффективность стабилизации автомобиля при частичном активных маневрах. Давление модулируется при регулировании со стороны ABS (пассивное регулирование) с помощью гидравлики ESP точно так же, как было описано для системы ABS.

Но поскольку системы ESP также должны активно нагнетать давление (активное регулирование) или повышать тормозное давление, создаваемое водителем (частично активное регулирование), используемый в ABS возвратный насос заменяется самовсасывающим насосом для каждого контура. Рабочие ци-

Рис. 8. Компоненты ESP:
1 – колесные тормоза; 2 – датчики угловой скорости колес; 3 – ЭБУ двигателя;
4 – электронно активируемый дроссельный клапан; 5 – датчик угла поворота рулевого колеса;
6 – усилитель тормозов с главным тормозным цилиндром;
7 – гидравлический блок с внешним ЭБУ;
8 – датчик вращения вокруг вертикальной оси со встроенным датчиком поперечного ускорения



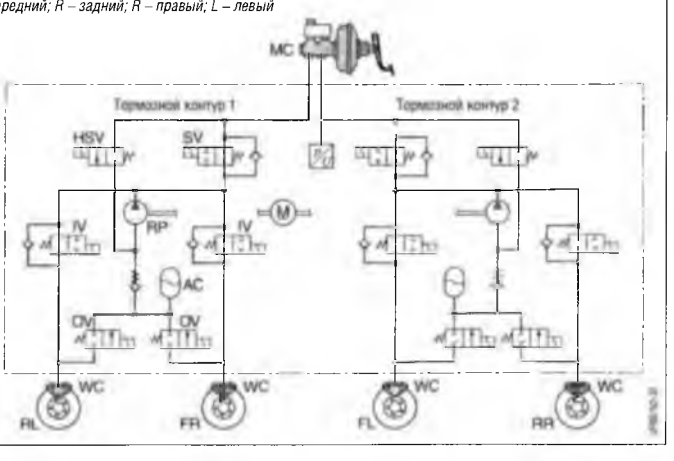
линдры тормозных механизмов колес и главный тормозной цилиндр соединяются через коммутационный клапан, открываемый при нулевом электрическом токе, и переключающий клапан высокого давления.

Дополнительный невозвратный клапан с определенным давлением закрытия предотвращает высасывание лишней тормозной жидкости из цилиндров колес. Насосы приводятся в действие электродвигателем постоянного тока в зависимости от потребностей. Двигатель вращает расположенный на его валу эксцентриковый подшипник.

На рис. 10 показаны три примера модуляции давления. Чтобы нагнеталось давление независимо от водителя (рис. 10, c), коммутационные клапаны закрываются, а переключающие клапаны высокого давления – открываются. Теперь самовсасывающий насос подает тормозную жидкость на соответствующее колесо или колёса, нагнетая давление. Впускные клапаны других колес остаются закрытыми Чтобы уменьшить давление, выпускные клапаны открываются, а переключающие клапаны высокого давления возвращаются в исходное положение (рис. 10, b). Тормозная жидкость вытекает из рабочих тормозных цилиндров колес в резервуары низкого давления, опоржняемые насосами. Управление двигателем насоса, в зависимости от потребностей, уменьшает шум при нагнетании и регулировании давления.

Для частично активного управления (рис. 10, a) переключающий клапан высокого давления должен быть способен открывать всасывающий канал насоса при высоком дифференциальном давлении (> 0,1 МПа). Первая ступень клапана открывается за счет магнитной силы катушки, находящейся под напряжением, а вторая ступень – за счет разности гидравлических площадей. Если контроллер ESP обнаружит нестабильное состояние автомобиля, то коммутирующие клапаны (открытые при нулевом электрическом токе) закрываются, а переключающий клапан высокого давления (закрытый при нулевом электрическом токе) открывается. Затем два насоса генерируют дополнительное давление для стабилизации автомобиля. По завершении вмешательства системы открывается выпускной клапан, и тормозная жидкость из рабочего тормозного цилиндра регулируемого колеса выходит в аккумулятор. Как только водитель отпустит педаль тормоза, тормозная жидкость откачивается из аккумулятора обратно в бачок.

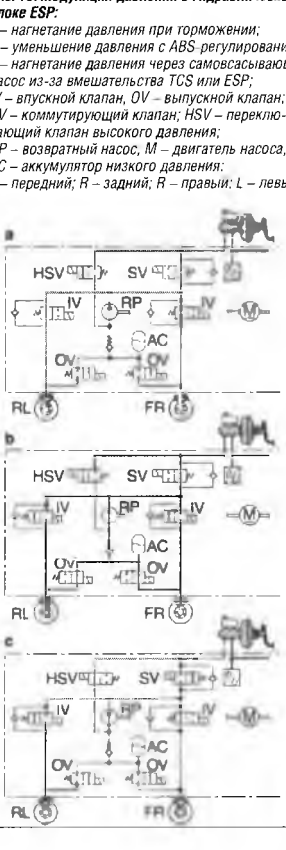
Рис. 9. Схема гидравлического блока ESP (X-образная конфигурация тормозных контуров):
MC – главный тормозной цилиндр; WC – рабочий тормозной цилиндр колеса; IV – впускной клапан; OV – выпускной клапан; SV – коммутирующий клапан; HSV – переключающий клапан высокого давления; RP – возвратный насос; M – двигатель насоса; AC – аккумулятор низкого давления; F – передний; R – задний; R – правый; L – левый



Система контроля

Комплексная система контроля безопасности является фундаментальной для обеспечения надежного функционирования ESP. Система контроля безопасности охватывает работу системы ESP вместе с ее компонентами и всеми другими функциональными взаимосвязями. В основе системы контроля безопасности лежат такие методы, как FMEA, FTA и исследования с моделированием неисправностей. Применяются методы по исключению ошибок, которые бы имели последствия, относящиеся к безопасности. Крупномасштабные программы контроля гарантируют надежное и точное определение всех ошибок датчиков, которые не могут быть полностью исключены. Эти программы основаны на хорошо разработанных надежных программных обеспечениях систем ABS и TCS, контролирующих все компоненты, подключенные к ЭБУ вместе с их электрическими подсоединениями. Со временем надежное программное обеспечение улучшалось более полным использованием возможностей, предоставлявшихся дополнительными датчиками и их последующим приспособлением к специальным компонентам и функциям ESP.

Рис. 10. Модуляция давления в гидравлическом блоке ESP:
a – нагнетание давления при торможении;
b – уменьшение давления с ABS-регулированием;
c – нагнетание давления через самовсасывающий насос из-за вмешательства TCS или ESP;
IV – впускной клапан, OV – выпускной клапан;
SV – коммутирующий клапан; HSV – переключающий клапан высокого давления;
RP – возвратный насос, M – двигатель насоса,
AC – аккумулятор низкого давления:
F – передний; R – задний; R – правый; L – левый



Работа датчиков контролируется в несколько этапов. Во время первой стадии датчики непрерывно контролируются во время управления автомобилем на обрыв проводов и вероятность прохождения сигнала (внедиапазонная проверка, определение помех, физическое правдоподобие). В течение второго этапа наиболее важные датчики проверяются отдельно. Датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси испытывается путем преднамеренной расстройки чувствительного элемента и затем оценивается на прохождение сигнала. Даже датчик ускорения имеет внутренний фоновый контроль. При активации сигнал датчика давления должен показывать предопределенную характеристику; происходит внутренняя компенсация смещения и усиления. Датчик угла поворота рулевого колеса имеет свои собственные контрольные функции, которые непосредственно сопровождают какое-либо ошибочное сообщение, поступающее к ЭБУ. Дополнительно контролирует цифровой сигнал, постоянно передаваемый к ECU. Во время третьего этапа применяется аналитическая избыточность для контроля работы датчиков во время стационарного режима эксплуатации автомобиля. В данном случае используется модель автомобиля с целью проверить тот факт, что не имеется нарушений для определенных связей между сигналами датчиков и движением автомобиля. Эти модели также часто применяются для вычислений и компенсирования смещений датчиков, поскольку они остаются в пределах технических условий.

В случае возникновения ошибки система выключается или частично, или полностью, что зависит от типа ошибки. Реагирование системы на ошибки также зависит от того, действительно ли осуществлялось управление.

Специальная система динамической стабилизации для коммерческих автомобилей

Функция

Тяжелые грузовики существенно отличаются от легковых автомобилей намного большей массой в сочетании с более высоким центром тяжести и дополнительными степенями свободы, обусловленными движением с прицепом [7]. Поэтому они могут подвергаться неустойчивым состояниям, выходящим далеко за рамки заноса, случающегося с легковыми автомобилями. К таким состояниям относятся складывание автопоездов, вызываемое, к примеру, заносом прицепа и опрокидывание, вызываемое большим поперечным ускорением. Поэтому система динамической стабилизации у грузовых автомобилей должна наряду с обеспечением стабилизации, как у легковых автомобилей, также предотвращать складывание автопоезда и опрокидывание.

Требования

В дополнение к требованиям, предъявляемым к легковым автомобилям, система динамической стабилизации у грузовиков, на основании расширенных функций, должна:

- улучшать курсовую устойчивость и реакцию автопоезда или сочлененного автобуса в пределах физически возможного во всех режимах и при любой загрузке; сюда относится предотвращение складывания автопоездов;
- снижать риск опрокидывания автомобиля или автопоезда как в квазистационарном режиме, так и при маневрах.

Эти требования, реализованные в ESP грузовых автомобилей, приводят, как в случае с легковыми автомобилями, к значительному повышению безопасности движения. По этой причине европейское законодательство, начиная с 2011 года, требует постепенного ввода системы динамической стабилизации для тяжелых грузовиков (более 7,5 т) (неотъемлемая часть ECE-R 13).

Применение

Между тем, ESP у грузовых автомобилей теперь предлагается практически для всех конфигураций автомобилей (кроме полноприводных):

- автомобили с колесными формулами 4×2, 6×2, 6×4 и 8×4,
- тягачи с полуприцепами (сочлененные автомобили или просто полуприцепы);
- тягачи с прицепами (автопоезда);
- тягачи с несколькими прицепами (Eurokombi), т.е. тягач, низкорамный прицеп и полуприцеп или полуприцеп с дополнительным прицепом с одной осью или сближенными двумя осями, установленными по центру тяжести.

Принцип действия:

Системы динамической стабилизации для грузовиков в соответствии с требованиями можно поделить на две описанные ниже функциональные группы.

Стабилизация автомобиля в случае угрозы заноса или складывания автопоезда

Динамическая стабилизация грузового автомобиля вначале выполняется согласно тем же принципам, которые действуют для легковых автомобилей. Контроллер сравнивает текущее движение автомобиля с движением, заданным водителем, с учетом физических возможностей. Однако физическая модель движения в горизонтальной плоскости – для отдельного автомобиля характеризуется тремя степенями свободы (продольная, поперечная и вокруг вертикальной оси) – у сочлененного автомобиля также включает в себя угол сочленения между тягачом и прицепом (дополнительная степень свободы). Существуют и другие степени свободы для комбинаций с малогабаритными прицепами.

Для расчета движения автомобиля, задаваемого водителем, ЭБУ использует упрощенные физико-математические модели (одноколейную модель автомобиля, [8]) для определения номинальной скорости вращения тягача вокруг вертикальной оси. Встречающиеся в этих моделях параметры (характеристическая скорость автомобиля v_{ch}, колесная база l и передаточное отношение рулевого механизма i_L) адаптируются к поведению автомобиля во время эксплуатации с помощью особых адаптационных алгоритмов (например, фильтры Кальмана или рекурсивная оценка по методу наименьших квадратов, [9]). Адаптация параметров в реальном времени особенно важна для грузовиков из-за гораздо большего разнообразия вариантов и нагрузок, чем у легковых автомобилей.

Параллельно с этим ESP вычисляет текущее движение автомобиля на основе измеренных значений скорости вращения вокруг верти-

кальной оси, бокового ускорения и скоростей колес. Значительное различие между движением автомобиля и движением, которое ожидает водитель, ведет к сбою управления, преобразуемому контроллером в корректирующий номинальный момент вращения вокруг вертикальной оси.

Уровень номинального момента вращения вокруг вертикальной оси у грузового автомобиля зависит от сбоя управления, текущей конфигурации автомобиля (колесная база, количество осей, эксплуатация с прицепом или без и т.д.) и состояния загрузки (масса, центр тяжести в линейном направлении и т.д.). Все эти параметры переменные, они непрерывно определяются системой ESP. Это достигается, к примеру, в загруженном состоянии с помощью оценочного алгоритма на основе сигналов системы управления двигателем (обороты и момент двигателя) и линейного движения автомобиля (скорости колес) для непрерывного определения текущей массы автомобиля.

На основании текущей ситуации движения номинальный момент вращения вокруг вертикальной оси соответствующим образом корректируется путем притормаживания отдельных колес прицепа. Это продемонстрировано на примере на рис. 11, a и 11, b для ярко выраженной избыточной и недостаточной поворачиваемости, соответственно.

Наряду с этими ярко выраженными ситуациями существуют и другие критические динамические ситуации, в которых колеса притормаживаются в зависимости от желаемого стабилизирующего эффекта. В случае с более серьезной недостаточной поворачиваемостью весь автомобиль тормозит по каналам, аналогичным тем, что используются в расширенной системе управления недостаточной поворачиваемостью (EUC) у легковых автомобилей.

Из-за высокого центра тяжести заносы и складывания у грузовых автомобилей возникают главным образом при низких и средних коэффициентах сцепления шин с дорогой, когда уже на ранней стадии превышается предел статического трения шин. При высоких коэффициентах сцепления загруженные грузовики из-за высокого центра тяжести обычно начинают опрокидываться до достижения предельного статического трения шин.

Уменьшение риска опрокидывания

Порог опрокидывания (пороговое поперечное ускорение) автомобиля зависит не только от высоты центра тяжести, но и от систем шасси (подвеска, стабилизаторы, пружины и т.д.) и типа полезной нагрузки (фиксированная или движущаяся) [10].

Причиной, вызывающей опрокидывание грузовика, помимо относительно низкого порога опрокидывания, является слишком высокая скорость при прохождении поворотов. ESP использует этот сценарий для уменьшения вероятности опрокидывания автомобиля. Как только автомобиль подходит к порогу опрокидывания, он тормозит посредством снижения крутящего момента двигателя и, при необходимости, задействования тормозов. Порог опрокидывания определяется здесь в зависимости от загрузки автомобиля и распределения нагрузки, при этом загруженное состояние автомобиля оценивается в реальном времени.

Определяемый порог опрокидывания корректируется в зависимости от ситуации движения. Таким образом, порог опрокидывания при высокой скорости, в очень динамичных ситуациях (например, при объезде препятствий) уменьшается, чтобы обеспечить раннее вмешательство системы. И наоборот, при очень медленных маневрах (например, прохождении крутых поворотов на горном серпантине), он повышается, чтобы предотвратить ненужное и деструктивное вмешательство ESP.

Определение порога опрокидывания основано на различных предположениях в отношении высоты центра тяжести и динамической реакции автопоезда с известным распределением нагрузки между осями. Это относится к большей части обычных автопоездов.

Для обеспечения динамической стабилизации даже в случае сильных отклонений от приемлемой ситуации (например, очень высокое расположение центра тяжести) ESP дополнительно обнаруживает возможный отрыв колес от поверхности дорогои на внутреннем радиусе поворота. Это достигается путем контроля колес на предмет неправдоподобной скорости вращения. При необходимости весь автопоезд интенсивно тормозится за счет вмешательства тормозной системы.

Отрыв колес прицепа на внутреннем радиусе поворота сигнализируется электронной тормозной системой прицепа (ELB) по шине CAN (SAE J 11992) путем активации контроллера ABS. У автопоездов с прицепами, оборудованными только системой ABS, выявление отрыва колес на внутреннем радиусе поворота осуществляется только у тягача.

Конструкция системы

На европейском рынке электронная тормозная система ELB стала стандартом в области управления тормозами у крупнотоннажных грузовиков. ESP базируется на этой системе, добавляя в неё регулирование динамики движения. Для этого ESP использует возможности ELB по созданию изменяемых тормозных сил на каждом колесе независимо от действий водителя.

Очень разные общие условия для тормозных систем грузовиков в Северной Америке означают, что стандартно используются только системы ABS или ABS/TCS. Поэтому для этих и аналогичных регионов используется система ABS/TCS на базе ESP. В этом случае ESP использует метод, уже применяемый системой TCS на приводной оси для создания тормозных сил отдельно на каждом колесе независимо от водителя с помощью клапана TCS и следующих за ними клапанов ABS. Кроме того, для ESP на базе ABS инициируемое водителем торможение должно измеряться датчиками давления, что при вмешательстве ESP было бы невозможно из-за работы клапана TCS.

Системы датчиков

Как и в легковых автомобилях, в качестве датчиков ESP в грузовиках используются комбинированный датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси и поперечного ускорения и датчик угла поворота рулевого колеса. Каждый из этих датчиков имеет микроконтроллер с интерфейсом CAN для анализа и безопасной передачи измеренных значений.

Датчик угла поворота рулевого колеса обычно монтируется непосредственно под рулевым колесом. Сигнал датчика преобразуется в ЭБУ в угол поворота рулевого колеса.

Чтобы измерять поперечное ускорение как можно ближе к центру тяжести тягача, комбинированный датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси и поперечного ускорения обычно монтируется рядом с центром тяжести.

Хотя в грузовых автомобилях в основном используются те же датчики, что и в лег-

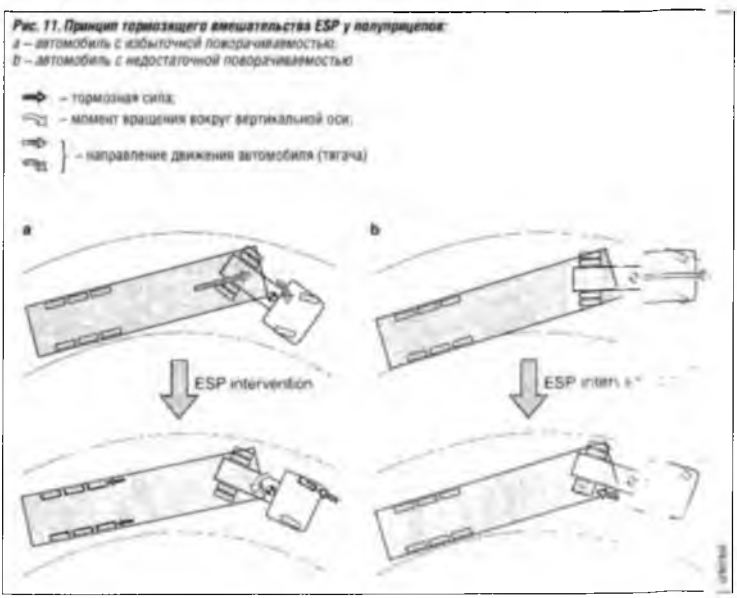


Рис. 11. Принцип тормозящего вмешательства ESP у полуприцепов:
a – автомобиль с избыточной поворачиваемостью;
b – автомобиль с недостаточной поворачиваемостью

ковых, датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси и поперечного ускорения должен иметь гораздо более прочную конструкцию, особенно рамы грузовика, чтобы выдерживать более жесткие условия эксплуатации.

Электронный блок управления

Алгоритмы ESP выполняются вместе с другими алгоритмами для управления тормозами (например, ABS и TCS) в блоке управления тормозами. Этот блок управления конструируется с помощью традиционной технологии печатных плат с мощными микроконтроллерами.

Шина CAN соединяет датчики ESP с блоком управления. Затем номинальные значения давления и скольжения колес по командам ESP реализуются соответствующей тормозной системой для каждого колеса и прицепа. В дополнение к этому тормозная система передает запрошенный крутящий момент двигателя по автомобильной шине CAN (обычно стандрата SAE J 1939) на ЭБУ двигателя для последующей его установки.

Кроме того, в тормозную систему передается необходимая информация от двигателя и тормоза-замедлителя по автомобильной шине CAN. Это в основном текущий и запрашиваемый крутящий момент и обороты двигателя, крутящий момент тормоза-замедлителя, скорость автомобиля и информация от различных выключателей и от имеющихся прицепов.

Функции обеспечения безопасности и контроля

Широкие возможности вмешательства ESP в характеристики управления автомобилем или автопоездом требуют наличия комплексной системы безопасности для обеспечения нормального функционирования системы. Это относится не только к базовой системе ELB или ABS/TCS, но и к дополнительным компонентам ESP, включая все датчики, ЭБУ и интерфейсы.

Используемые в ESP функции контроля в основном базируются на функциях, используемых в легковых автомобилях и адаптируются к характеристикам грузовиков.

Выполняется также взаимный контроль микроконтроллеров, распределенных по всей системе. Это означает, что в блоке управления тормозами имеется главный компьютер и контролирующий компьютер, в основном выполняющий проверки правдоподобности и мелкие функциональные задачи. Кроме того, соответствующие алгоритмы постоянно проверяют память и прочие внутренние устройства компьютера для определения дефектов, которые могут возникнуть на ранней стадии.

Возникновение неисправностей, в зависимости от их характера и значимости, приводит к различным последствиям – от выключения отдельных функциональных групп до полного перехода в резервный режим, когда управление тормозами осуществляется чисто пневматически. Это предотвращает неправдоподобные и потенциально опасные состояния при торможении из-за некорректных сигналов датчиков.

Возникновение неисправности сигнализируется водителю подходящими средствами (например, сигнализатором или сообщением на дисплее), чтобы можно было предпринять соответствующие меры.

Кроме того, любые возникающие неисправности получают в блоке управления отметку времени и хранятся в ЗУ неисправностей. Специалисты СТО могут проанализировать их с помощью подходящей диагностической системы.

Список литературы

[1] Liebemann, E.K.; Meder, K.; Schuh, J.; Nenninger, G.: Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control. SAE Paper Number 2004-21-0060.
[2] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) FMVSS 126: Federal Motor Vehicle Safety Standards; Electronic Stability Control Systems; Controls and Display. Vol. 72, No. 66, April 6, 2007.
[3] Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4th Edition, Springer-Verlag, 2004.
[4] van Zanten, A.; Erhardt, R.; Pfaff, G.: FDR – Die Fahrdynamikregelung von Bosch. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 96 (1994), Volume 11.
[5] Trachtler, A.: Integrierte Fahrdynamikregelung mit ESP, aktiver Lenkung und aktivem Fahrwerk. at – Automatisierungstechnik 53 (2005) 1.
[6] Reif, K.: Automobilelektronik, 3rd Edition, Vieweg+Teubner, 2009.
[7] Hoepke, E.; Breuer, S. (Editors): Nutzfahrzeugtechnik – Grundlagen, Systeme, Komponenten. 4th Edition; Vieweg Verlag, 2006.
[8] Winkler, C.B.: Simplified Analysis of the Steady State Turning of Complex Vehicles. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 1996.
[9] Sayed, Ali H.: Adaptive Filters. John Wiley & Sons, 2008.
[10] Odenthal, D.: Ein robustes Fahrdynamik-Regelungskonzept fur die Kippvermeidung von Kraftfahrzeugen. Dissertation TU Munchen, 2002.

Дополнительные функции (автоматические операции тормозной системы)

Описанные ниже дополнительные функции используют инфраструктуру системы ESP, за исключением пневмо-механической системы экстренного торможения. Сюда входят датчики, исполнительные механизмы и ЭБУ.

Операции системы экстренного торможения

Исследования манеры торможения у различных водителей, проведенные в 1990-х годах, показали, что водители различаются тем, что по-разному реагируют на ситуации торможения. Большинство – «среднестатистические водители» – не тормозят слишком резко в экстренной ситуации, иными словами, им требуется неоправданно длинный тормозной путь (рис. 1). Это можно устранить с помощью системы экстренного торможения, появившейся на рынке в 1995 году. Ее основные задачи следующие:

- интерпретация определенной скорости движения педали (быстрое нажатие на тормоз), не способной создать максимальное тормозное усилие, задаваемое водителем для выполнения полного торможения; в этом случае она создает тормозное давление, необходимое для достижения эффекта полного торможения;
- она позволяет водителю в любой момент «отменить» операцию полного торможения;
- поведение усилителя тормозов и, следовательно, обратная связь на педали не изменяются при обычных условиях торможения;
- при отказе этой системы основная функция тормозной системы не уменьшается;
- система имеет защиту от случайной активации.

Рис. 1. Сравнение торможения с системой экстренного торможения и без нее

Без системы экстренного торможения требуется более длинный тормозной путь, чем при наличии этой системы.

1 – среднестатистический водитель;

2 – опытный водитель, 3 – среднестатистический водитель, с системой экстренного торможения;

t – задержка торможения увеличивает тормозной путь



Пневматическая система экстренного торможения

Для этой системы требуется модифицированный усилитель тормозов, повышающий усиление согласно скорости движения педали и усилию нажатия на педаль. Это приводит к более быстрому и интенсивному нагнетанию давления в колесных тормозах.

В альтернативной версии в усилитель тормозов добавляется электронно активируемый клапан. Это позволяет ЭБУ влиять на разность давления между камерами усилителя тормозов и, соответственно, на усилие тормозной силы. Это дает больше возможностей для оптимизации порога срабатывания и характеристик реагирования.

Гидравлическая система экстренного торможения

Гидравлическая система экстренного торможения использует аппаратные средства ESP. Датчик давления определяет намерение водителя затормозить; ЭБУ анализирует сигнал на основе заданных критериев срабатывания и инициирует соответствующее нагнетание тормозного давления в гидравлической системе. Расположенный перед ней усилитель тормозов является стандартным блоком и не требует модификаций.

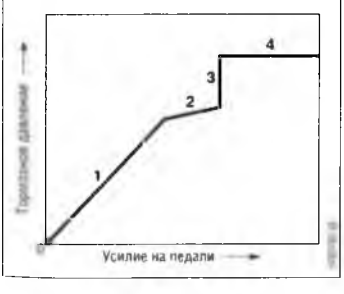
В качестве общего наблюдения следует отметить, что абсолютным требованием является использование всех вариантов систем экстренного торможения в сочетании с ABS, TCS или ESP из-за активного роста тормозного давления сверх порога блокировки колес.

Автоматическое повышение тормозного давления на задних колесах

Эта функция помогает водителю дополнительным серво-торможением задних колес, если передними колесами управляет ABS. Эта функция появилась в связи с тем, что многие водители не увеличивают усилие на педали в начале вмешательства ABS, несмотря на то, что этого требует ситуация. При вмешательстве ABS на передних колесах давление на колесах задней оси повышается с помощью возвратного насоса гидравлического модулятора, пока на них также не будет достигут порог блокирования и не произойдет вмешательство ABS (рис. 2). Поэтому торможение происходит физически оптимально. В этом случае давление в рабочих цилиндрах колес задней оси может превысить давление в главном тормозном цилиндре, также и при вмешательстве ABS.

Условие отсечки выполняется, когда ABS прекращает регулировать колеса передней оси или когда давление в главном тормозном цилиндре падает ниже порога отсечки.

Рис. 2. Автоматическое увеличение тормозного давления:
1 – увеличение тормозного усилия усилителем тормозов; 2 – дальнейшее увеличение тормозного усилия педалью тормоза; 3 – повышение тормозного давления гидравлической системой ESP, 4 – диапазон регулирования ABS



Автоматическое повышение тормозного давления мощным нажатием педали тормоза

Эта функция поддерживает водителя дополнительным серво-торможением. Она активируется, если не удается достичь максимально возможного замедления автомобиля даже при настолько сильном нажатии педали, когда обычно создается давление блокирования колес (первичное давление более 80 бар). Это происходит, к примеру, при высокой температуре тормозного диска или значительном снижении коэффициента трения тормозных колодок.

При активации этой функции давление в рабочих цилиндрах колес растет до тех пор, пока на всех колесах не будет достигнуто давление блокирования и не произойдет вмешательство ABS (рис. 2). Поэтому торможение происходит физически оптимально. В этом случае давление в рабочих цилиндрах колес может превысить давление в главном тормозном цилиндре, также и при вмешательстве ABS.

Если водитель уменьшит желаемый уровень торможения до величины, которая будет ниже конкретного порогового значения, то замедление автомобиля уменьшится соответственно усилию на педали тормоза. Поэтому водитель может точно модулировать замедление автомобиля после торможения. Условие отсечки выполняется при падении первичного давления или скорости автомобиля ниже соответствующего порога отсечки.

Очиститель тормозного диска

Эта функция обеспечивает циклическое удаление брызг воды с тормозных дисков в дождливую погоду или на мокрой дороге. Это достигается путем автоматической установки низкого тормозного давления на колесных тормозах. Таким образом, эта функция помогает обеспечить минимальное время реакции тормозов при езде в сырую погоду. Для определения наличия сырости используются сигналы очистителей лобового стекла или датчика дождя.

Уровень давления регулируется таким образом, чтобы замедление автомобиля не воспринималось водителем. Приведение в действие повторяется через определенные интервалы, пока система не определит, что идет дождь или дорога мокрая. При необходимости могут очищаться только диски на передней оси. Процедура очищения прекращается при нажатии на педаль тормоза.

Автоматическое наполнение гидросистемы
Эта функция уменьшает общий тормозной путь в экстренных ситуациях, при этом водитель нажимает на педаль тормоза сразу после отпускания педали газа. Это достигается путем заполнения гидравлического контура тормозной системы после отпускания педали газа, что означает значительно более динамичное нагнетание давления при последующем торможении. Соответственно, сильное замедление автомобиля начинается раньше.

Заполнение гидравлического контура тормозной системы регулируется возвратным насосом гидравлического модулятора ESP. При этом тормозные колодки плотно прилегают к тормозным дискам. Если сразу после резкого отпускания педали газа не будет нажата педаль тормоза, то давление в тормозной системе снова упадет. Это не ухудшает общую управляемость автомобиля.

Электромеханический стояночный тормоз
Электромеханический стояночный тормоз (EMP) создает силу для включения стояночного тормоза электромеханическими средствами. Функция ручного или ножного стояночного тормоза выполняется при помощи ручки управления с комбинацией электродвигателя и редуктора. Когда водитель поворачивает ручку управления, в случае обнаружения системой неподвижного положения автомобиля активируется электродвигатель. Когда автомобиль паркуется на горизонтальной поверхности, натяжение троса устанавливается меньшим, чем при полной загрузке автомобиля, припаркованного на уклоне. Для определения припаркованного (т.е. неподвижного) состояния используются активные колесные датчики. Кроме того, специальным датчиком может определяться угол уклона.

Стояночный тормоз отпускается с помощью той же ручки управления. Однако для предотвращения случайного отпускания стояночного тормоза детьми или животными должны выполняться различные правила и требования к безопасности.

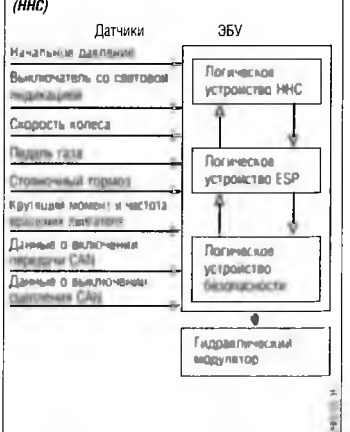
Управляемое торможение гидравлической системой ESP
При активации электромеханического стояночного тормоза во время движения автомобиль должен безопасным образом тормозиться до полной остановки. Необходимое тормозное давление нагнетается возвратным насосом гидравлического модулятора ESP. Системы ABS и ESP обеспечивают безопасное торможение даже на скользкой и мокрой дороге. Когда автомобиль останавливается, электромеханический стояночный тормоз выполняет функцию удерживания автомобиля в неподвижном состоянии.

Во время замедления водитель должен непрерывно нажимать кнопку активации автоматического стояночного тормоза.

Система помощи при трогании на подъеме (HHC)
Эта система упрощает трогание с места на подъемах. Она предотвращает откатывание автомобиля после отпускания педали тормоза. Это особенно полезно на тяжелых загруженных автомобилях с механической трансмиссией и на автомобилях с прицепами. Задействовать стояночный тормоз в этом случае не нужно. Эта функция также работает при трогании с места на подъемах задним ходом.

Система определяет намерение водителя тронуться с места (рис. 3). После отпускания

Рис. 3. Система помощи при трогании на подъеме (HHC)



педали тормоза остается примерно две секунды до начала трогания. При этом тормоз отпускается автоматически, если крутящий момент привода больше крутящего момента откатывающей силы.

Система HHC базируется на аппаратной части ESP с дополнительными датчиками – датчик наклона определяет угол уклона дороги, датчик передачи определяет, включена ли задняя передача, а датчик сцепления определяет, нажата ли педаль сцепления.

Автоматическое торможение на спуске (HDC)

Эта система помогает водителю на внедорожных спусках с уклоном 8–50 % посредством автоматического торможения. Это позволяет водителю полностью сконцентрироваться на рулевом управлении, не отвлекаясь на торможение. Педаль тормоза нажимать не нужно.

При активации этой системы, например, нажатием кнопки или выключателя, во всем диапазоне заданного тормозного давления поддерживается предустановленная скорость. При необходимости водитель может изменить предустановленную скорость, нажав педали тормоза и газа или с помощью кнопок управления системы регулировки скорости.

Система остается активной до её выключения повторным нажатием кнопки или выключателя, т.е. она не отключается автоматически.

Автоматическое торможение для систем адаптивного круиз-контроля

Это дополнительная функция для активного торможения с адаптивным круиз-контролем (ACC), т.е. для автоматического выбора дистанции. Водителю не нужно нажимать на педаль тормоза – торможение происходит автоматически, как только дистанция до движущегося впереди автомобиля сокращается до определенной величины (рис. 4). В основе лежат гидравлическая тормозная система и система ESP.

Эта функция получает запрос на торможение автомобиля до определенной степени (вводная переменная). Торможение вычисляется системой ACC. Автоматическое торможение поддерживает торможение автомобиля посредством соответствующего тормозного давления, регулируемого с помощью гидравлического модулятора ESP.



Рис. 4. Принцип работы автоматического торможения для ACC:
1 – замедление, задаваемое адаптивным круиз-контролем (ACC);
2 – текущее замедление;
3 – давление в рабочих тормозных цилиндрах колес

Интегрированные системы управления динамикой движения

Обзор

Наряду с тормозами и двигателем, используемыми системой динамической стабилизации (ESP), в шасси и приводе имеются другие исполнительные механизмы, целенаправленно влияющие на динамику движения. Функциональное сочетание исполнительных органов, относящихся к динамике движения, имеют разные названия у разных автопроизводителей и поставщиков: управление динамикой автомобиля (Vehicle Dynamics Management, VDM), интегрированное управление шасси (Integrated Chassis Control, ICC), интегрированное управление шасси (Integrated Chassis Management, ICM) и глобальное управление шасси (Global Chassis Control, GCC)

Основные области применения
Эти системы применяются главным образом для управления курсовой устойчивостью, маневренностью и уменьшением нагрузки на водителя, т.е. усилий, прикладываемых водителем для управления автомобилем.

Улучшение курсовой устойчивости
В критических ситуациях эти системы решают задачи по динамической стабилизации, обычно выполняемые самим водителем. Типичными примерами являются избыточная поворачиваемость или торможение на дорогах с разными коэффициентами сцепления с левой и с правой стороны (μ-разделение).

Повышение маневренности
Некоторые из этих функций улучшают реакцию поперечной динамики автомобиля на выполняемое водителем рулевое управление. Они делают автомобиль более маневренным, т.е. он более непосредственно и динамично реагирует на действия водителя

Уменьшение усилий управления автомобилем
Улучшенная реакция автомобиля на движения рулевого колеса и автоматические стабилизирующие вмешательства снимают с водителя нагрузку, в частности, уменьшая усилия на рулевом колесе

Функции

Рекомендуемое усилие на рулевом колесе в зависимости от динамики
Функции
Эта функция использует в качестве исполнительного механизма электроусилитель рулевого управления. На крутящий момент сервоусилителя рулевого управления накладывается дополнительный крутящий момент, зависящий от динамики движения.

Ограничение дополнительного крутящего момента рулевого управления
Дополнительный крутящий момент рулевого управления ограничивается, в зависимости от автомобиля, значениями около 3 Н·м, чтобы водитель мог в любой момент скорректировать рекомендуемое усилие на рулевом колесе. Из-за сравнительно малого дополнительного крутящего момента рулевого управления эта функция не воздействует непосредственно на движение автомобиля, а лишь косвенно – путем влияния на реакцию водителя.

Ситуации динамики движения
Функция рекомендуемого усилия на рулевом колесе активируется в различных ситуациях.



Рис. 1. Рекомендуемое рулевое усилие с дополнительным рулевым моментом: *a – избыточная поворачиваемость; b – торможение на дороге с разными коэффициентами сцепления; M_L – дополнительный рулевой момент; M_Z – момент вращения вокруг вертикальной оси, соответствующий ожидаемой реакции водителя; F_B – тормозная сила*

В ситуации с избыточной поворачиваемостью создается крутящий момент в направлении, противоположном уводу (рис. 1, a). В случае недостаточной поворачиваемости эта функция мотивирует водителя не увеличивать угол поворота рулевого колеса, так как потенциал боковой силы на передних колесах уже исчерпан, и дальнейшее руление может даже уменьшить поперечную силу.

При торможении или разгоне на дорогах с разными коэффициентами сцепления с левой и правой стороны автомобиля (μ-разделение) происходит компенсирование вращения вокруг вертикальной оси путем выруливания (рис. 1, b).

Активная стабилизация рулевого управления на передней оси

Функции

Эта функция непосредственно вмешивается в движение автомобиля с помощью рулевого актюатора, обеспечивающего дополнительный угол поворота. В специальном редукторе устанавливаемый электродвигателем дополнительный угол поворота добавляется к углу, задаваемому водителем.

Ситуации со сложной динамикой движения

Эта функция работает, к примеру, в ситуации с избыточной поворачиваемостью. Система регулирования вращения вокруг вертикальной оси с автоматической коррекцией угла поворота возвращает избыточно высокий момент вращения вокруг вертикальной оси на заданный уровень.

При торможении на дорогах с разными коэффициентами сцепления эта функция компенсирует рыскание. Нагрузка на водителя значительно уменьшается при стабилизации автомобиля. Поскольку компенсация рыскания инициируется автоматически и происходит гораздо быстрее, чем руление среднестатистического водителя, то можно урезать меры по задержке увеличения момента вращения вокруг вертикальной оси, реализуемые системой ESP. Также сокращается тормозной путь.

Еще одно преимущество можно получить при недостаточной поворачиваемости и трогании с места на дорогах с разными коэффициентами сцепления.

Требования к системе датчиков

Из-за большой скорости позиционирования системы рулевого управления приоритетного действия, сигналы датчиков должны контролироваться с малой задержкой сигнализации неисправностей. Это означает, что инерционная система датчиков должна иметь резервированную конструкцию.

Активная стабилизация рулевого управления на задней оси

Функции

В автомобилях с управляемой задней осью первичная функция регулирует угол поворота задней оси в зависимости от угла поворота рулевого колеса и скорости движения. На небольшой скорости задние колеса поворачиваются в противоход передним, что повышает маневренность.

На высокой скорости задние колеса поворачиваются в одном направлении с передними. Таким образом, при объезде препятствий рыскание происходит менее интенсивно. Это значительно повышает курсовую устойчивость.

Ситуации со сложной динамикой движения

Соответствующие функции действуют в ситуациях, схожих с активными вмешательствами в рулевое управление передней оси. Эффективность вмешательств в рулевое управление ключевым образом зависит от текущего использования потенциала поперечных сил на задних колесах.

При торможении на дорогах с разными коэффициентами сцепления для подавления рыскания необходимы вмешательства с большими углами вследствие уменьшения нагрузки на заднюю ось. С другой стороны, торможение может иметь место без значительного изменения угла.

Требования к системе датчиков

Функции для рулевого управления задней оси тоже требуют инерционной системы датчиков с резервированием, так как скорость позиционирования рулевого исполнительного механизма на задней оси сравнима с приоритетным рулевым управлением.

Распределение крутящего момента в продольном направлении у автомобилей с приводом на четыре колеса

Функции

В автомобилях с приводом на четыре колеса блокировка межосевого дифференциала или перенос крутящего момента между осями в рамках их базовой функции улучшают тяговое усилие и, соответственно, разгонные характеристики автомобиля, при этом тяговое усилие передается колесами на обеих осях.

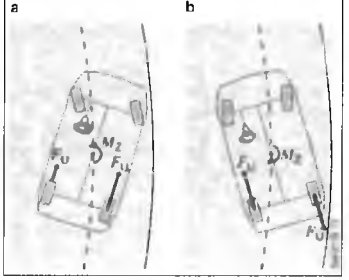
Ситуации со сложной динамикой движения
В ситуациях, при которых коэффициент сцепления с дорогой используется не полностью, можно изменять подруливающие свойства, смещая тяговые усилия между передней и задней осями. Чем больше тяговое усилие передается на ось, тем сильнее ослабляется потенциал поперечной силы на колесах этой оси. Смещение тягового усилия на переднюю ось повышает тенденцию к недостаточной поворачиваемости, а на заднюю ось – понижает ее (см. «Распределение крутящего момента»). Через динамическое управление распределением крутящего момента можно повысить поперечную динамику, при этом у автомобиля не появится тенденция к избыточной поворачиваемости.

Распределение крутящего момента колес в поперечном направлении

Функции
Функции на основе векторизации крутящего момента значительно способствуют повышению маневренности. Исполнительный механизм позволяет произвольно смещать крутящий момент на оси с одного колеса на другое. Таким образом, общая вращающая сила, за исключением потерь на трение, не уменьшается – это означает, что это вмешательство практически нейтрально по отношению к скорости движения.

Ситуации со сложной динамикой движения
При недостаточной поворачиваемости крутящий момент на колесе, движущемся по внешнему радиусу, увеличивается, а на колесе, движущемся по внутреннему радиусу - уменьшается. Таким образом, на автомобиль воздействует дополнительный момент вращения вокруг вертикальной оси (рис. 2, a). Тенденция к недостаточной поворачиваемости снижается; поперечная маневренность повышается

Рис. 2. ***Распределение крутящего момента колес в поперечном направлении:***
a – недостаточная поворачиваемость; b – избыточная поворачиваемость; F_U – тангенциальная сила на колесе (движение, торможение); M_Z – момент вращения вокруг вертикальной оси на основании вмешательства системы управления



При ускорении на дорогах с разными коэффициентами сцепления приводной момент направляется на колесо с большим коэффициентом сцепления. Одновременно система управления тяговым усилием притормаживает колесо с низким коэффициентом сцепления. Это повышает среднее ускорение на дорогах с разными коэффициентами сцепления.

Даже в ситуации с избыточной поворачиваемостью притормаживание частично заменяется межколесным перераспределением крутящего момента (рис. 2, b). Таким образом, потерю скорости можно уменьшить путем притормаживающего вмешательства ESP. В критических ситуациях с избыточной поворачиваемостью все равно происходит притормаживание, так как в этом случае потеря скорости желательна – для смягчения ситуации.

Замена межколесного распределения момента вмешательством тормозной системы и системы управления двигателем
Вмешательства при недостаточной поворачиваемости на основе векторизации момента можно заменять торможением колес, движущихся по внутреннему радиусу поворота. При этом увеличивается крутящий момент двигателя, компенсируя одностороннее торможение. В результате возникает эффект, похожий на вмешательство при недостаточной поворачиваемости путем векторизации момента. Для этого нужен лишь гидравлический модулятор с длительным сроком службы и невысоким уровнем шума вместо дополнительного органа, перераспределяющего момент.

Влияние на подруливающие свойства через стабилизацию поперечной устойчивости

Функции
В соответствии со своей ориентированной на комфорт базовой функцией, системы стабилизации поперечной устойчивости служат для компенсирования крена в поворотах.

Ситуации со сложной динамикой движения
Когда система стабилизации поперечной устойчивости имеет двухканальную конструкцию с раздельной активацией исполнительных

органов на передней и задней осях, существует дополнительная возможность влияния на подруливающие свойства. Крутящий момент, компенсирующий крены - в рамках работы отдельных каналов - можно активно перераспределять между передней и задней осями. В результате изменяются силы, воздействующие на колеса.

Влияние на подруливающие свойства основано на пропорционально снижаемом увеличении поперечных сил под действием продольных сил (рис. 3). Когда момент поперечной устойчивости в значительной степени поддерживается на задней оси, сильно увеличивается продольная сила на заднем колесе, движущемся по внешнему радиусу поворота; но соответствующая боковая сила в пропорциональном отношении увеличивается лишь частично. Поперечная сила на задней оси ослабевает, и тенденция к недостаточной поворачиваемости снижается. И наоборот, тенденция к недостаточной поворачиваемости повышается, когда момент поперечной устойчивости в значительной степени поддерживается на передней оси.

Влияние на подруливающие свойства через регулирование амортизации

Функции

Использование амортизаторов с регулируемой жесткостью для адаптивного смягчения вертикального перемещения кузова сейчас очень распространено. Продольное и поперечное раскачивание, вызываемые действиями водителя – торможением и рулевым управлением или дефектами дорожного покрытия, а также вертикальные перемещения, вызываемые дефектами дорожного покрытия, можно ощутимо уменьшить.

Ситуации со сложной динамикой движения

В ограниченной степени можно также влиять на подруливающие свойства. Механизм действия соответствует влиянию на подруливающие свойства через стабилизацию поперечной устойчивости. Однако эта функция имеет лишь кратковременный эффект во время поперечной раскачки кузова, поскольку необходимым условием для амортизирующих сил является перемещение амортизатора. Амортизирующие силы можно модулировать путем изменения жесткости амортизаторов так, чтобы силы, воздействующие на колеса, можно было полуактивно распределять, как было описано выше.

Архитектура системы

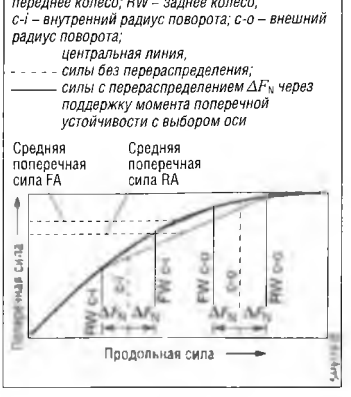
Распределение функций между ЭБУ

Исполнительные органы в шасси и приводе обычно активируются не только функциями интегрированных систем управления динамикой, но и в первую очередь базовыми функциями, очень тесно связанными с исполнительным механизмом. Примерами таких базовых функций могут служить «помощники» в системах с электроусилителем рулевого управления или переменное передаточное отношение в системе приоритетного руления.

Основные функции характеризуются умеренным объединением в сеть с другими автомобильными системами. Из-за своей тесной связи с исполнительным механизмом они обычно встраиваются в соответствующий ЭБУ, который также активирует исполнительный орган и контролирует его.

С другой стороны, функции интегрированных систем управления динамикой очень тесно связаны между собой, в частности, с ESP и другими системами управления шасси. Они вычисляют номинальное значение динамики для исполнительного механизма, передаваемое по шине данных на ЭБУ. Организация доступа к общей шине номинальных значений базовых функций выполняется в ЭБУ.

Рис. 3. Поперечная сила в зависимости от продольной силы с постоянным углом бокового увода
Уменьшение тенденции к недостаточной поворачиваемости путем смещения продольных сил на колесе
FA – передняя ось; RA – задняя ось, FW – переднее колесо; RW – заднее колесо; с-i – внутренний радиус поворота; с-o – внешний радиус поворота;
центральная линия,
силы без перераспределения;
силы с перераспределением ΔF_N через поддержку момента поперечной устойчивости с выбором оси



ЭБУ для управления динамикой, или центральный ЭБУ функциональной области «шасси» подходит для использования в качестве платформы для функций интегрированных систем управления динамикой (рис. 4).

Взаимодействие различных функций

В автомобилях устанавливают все больше различных функций и исполнительных механизмов. Это требует функциональной структуры, гарантирующей хорошее взаимодействие отдельных функций и, прежде всего, предотвращающей взаимные помехи.

Прежняя тенденция, когда у каждого исполнительного механизма был свой контроллер, исчерпала себя. Однако полное объединение всех алгоритмов в центральном контроллере ограничивает гибкость распределенной разработки и использования ресурсов ЭБУ.

Более обещающим компромиссом является объединение всех контроллеров, использующих принцип связанного позиционирования, поскольку вмешательства по принципу связанного позиционирования требуют особенно интенсивной координации.

Принципы позиционирования и системы позиционирования:

- крутящий момент на колесе: система управления динамикой, управляемая блокировка дифференциала, векторизация момента;
- угол поворота: приоритетное рулевое управление (передняя ось) и рулевое управление на задней оси;
- продольная сила: стабилизация поперечной устойчивости, регулировка жесткости амортизаторов;

Рекомендуемое усилие на руле играет особую роль, так как не воздействует непосредственно на движение автомобиля. Оно должно соотноситься с функциями приоритетного рулевого управления в плане воздействия, оказываемого на водителя.

Список литературы

[1] Isermann (Editor): Fahrdynamikregelung Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006.

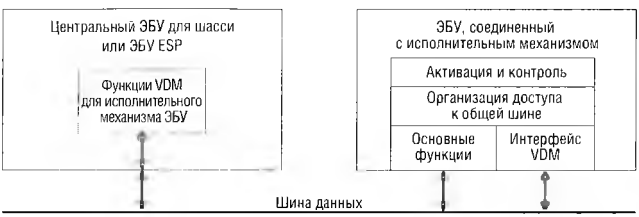
[2] Deiss, Knoop, Krimmel, Liebemann, Schroder: Zusammenwirken aktiver Fahrwerk und Triebstrangsysteme zur Verbesserung der Fahrdynamik. 15th Aachen Colloquium Automotive and Engine Technology, Aachen 2006, PP. 1671…1682.

[3] Klier, Kieren, Schroder: Integrated Safety Concept and Design of a Vehicle Dynamics Management System. SAE
Paper 07AC-55, 2007.

[4] Erban, Knoop, Flehmig: Dynamic Wheel Torque Control – DWT. Agility enhancement by networking of ESP and torque vectoring. 8th European All-wheel Congress, Graz 2007, PP. 17.1…17.10.

[5] Flehmig, Hauler, Knoop, Munkel: Improvement of Vehicle Dynamics by Networking of ESP with Active Steering and Torque Vectoring. 8th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Report Vol. No. 2, PP. 277…291, Vieweg Verlag, Wiesbaden 2008.

Рис. 4. Схема системы для реализации функций интегрированного управления динамикой движения (VDM):



Систематизация транспортных средств

Транспортное средство	Определение, примеры
Автомобили с механическим приводом	Транспортные средства с приводом от двигателя
Двухколесные с механическим приводом	Одноколейные транспортные средства с 2-мя колесами, в т ч с коляской
Мотоциклы	С закрепленными деталями (например, бак) в зоне коленей водителя
Мопеды	Без закрепленных деталей в зоне коленей водителя
Велосипеды со вспомогательным двигателем	С характеристиками велосипедов (мопеды, велосипеды с мотором)
Автомобили	Двухколейные механические транспортные средства
Легковые автомобили	Вместимостью максимум 9 человек
Седан	Закрытый кузов, максимум 4 боковые двери
Седан кабрио	Верх может открываться, неубирающиеся боковины
Седан пульман	Удлиненный салон, максимум 6 боковых дверей
Купе	Закрытый кузов, максимум 2 боковые двери
Кабриолет	С открытым верхом, могут иметь защиту от опрокидывания, 2 или 4 двери
Универсал	Большое внутреннее пространство, объединены пассажирский отсек и багажный салон
Грузовой универсал	Легкие универсальные автофургоны
Специальные легковые автомобили	Например, автомобили скорой помощи, развлекательные автомобили
Универсал повышенной вместимости	Внедорожники, мощные седаны
Грузовые автомобили	Перевозка пассажиров и грузов
Автобусы	Перевозка более 9 человек и багажа
Микроавтобусы	Вместимостью максимум 17 человек
Городские автобусы	Для городских маршрутов, сидячие и стоячие места
Междугородные автобусы	Для загородных маршрутов, без мест для стояния
Туристические автобусы	Перевозки на дальние расстояния, без мест для стояния
Троллейбусы	Запитываемые от контактных проводов
Сочленные автобусы	Две сочлененные сообщающиеся между собой секции
Специальные автобусы	Специальные автомобильные кузова, например, для инвалидов, заключенных
Грузовики	Перевозка грузов
Универсальные грузовики	Грузовики с открытым или закрытым кузовом
Специальные грузовики	Перевозка специальных грузов (например, автоцистерны) или использование в особых условиях (например, буксировка других автомобилей)
Тягачи	Перевозка грузов на прицепах и полуприцепах
Автомобили с прицепом	Для перевозки грузов на дополнительных грузовых площадках и прицепах
Седельные тягачи	Для перевозки грузов на полуприцепах
Сельскохозяйственные тракторы	Тягачи, предназначенные для толкания, перевозки или привода взаимозаменяемых частей
Прицепы в сцепке с автомобилем	Несамоходное грузовое транспортное средство
Автопоезда сочлененные	
Автопоезда жесткие	
Прицепы с центральной осью	
Полуприцепы	
Универсальные прицепы	
Автобусы-прицепы	
Жилые прицепы	
Специальные прицепы	
Автопоезда	**Автомобили с прицепом**
Легковые автомобили	Легковые автомобили с прицепом
Пассажирские автопоезда	Автобусы с прицепом
Автопоезда	Грузовики с прицепом
Тягачи	Тягачи с прицепом
Сочлененные автопоезда	Тягачи с полуприцепом
Седельные тягачи с полуприцепом	Грузовые автомобили с полуприцепом
Автопоезда с кузовом без бортов	Грузовики или тягачи со специальным прицепом «долли» (низкорамным)

Классификация

Классификация по ECE

Классификация автомобилей по ECE (Economic Commission of Europe, Европейская комиссия по экономике), R.E.3 (Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles, консолидированная резолюция по автомобилестроению).

Категория L

Транспортные средства с двумя или тремя колесами.

Категория	Тип	Рабочий объем двигателя	Макс. скорость
L_1	двухколесные	≤ 50 см^3	< 50 км/ч
L_2	трехколесные	≤ 50 см^3	≤ 50 км/ч
L_3	двухколесные	> 50 см^3	> 50 км/ч
L_4	трехколесные асимметричные по отношению к продольной оси	> 50 см^3	> 50 км/ч
L_5	трехколесные симметричные по отношению к продольной оси	> 50 см^3	> 50 км/ч

Категория M

Автомобили не менее чем с четырьмя колесами, предназначенные для перевозки пассажиров.

Категория	Сиденье водителя + пасс. сиденья	Всего Масса
M_1	≤ 9	
M_2	> 9	≤ 5 т
M_3	> 9	> 5 т

Категории M_2 и M_3 подразделяются на подкатегории (только с сиденьями, с сиденьями и местами для проезда стоя, категории I–III и A и B)

Категория N

Автомобили не менее чем с четырьмя колесами, предназначенные для перевозки грузов

Категория	Полная масса
N_1	≤ 3.5 т
N_2	> 3.5 т, ≤ 12 т
N_3	> 12 т

Категория O

Прицепы и полуприцепы

Категория	Полная масса
O_1	≤ 0,75 т
O_2	> 0,75 т, ≤ 3,5 т
O_3	> 3,5 т, ≤ 10 т
O_4	> 10 т

Автомобили категорий M, N и O могут оснащаться специальным оборудованием (например, «дом на колесах», автомобиль скорой помощи).

Существуют также классификации машин для сельского и лесного хозяйства и других внедорожных машин (Категория G).

Классификация в США

Фундаментальные определения автомобилей в 49 CFR Part 523 "Vehicle Classification" (CFR, Кодекс федеральных правил США): четырехколесные автомобили с разрешенной полной массой до 10 000 фунтов, работающие на углеводородном или альтернативном топливе, предназначенные для эксплуатации на дорогах общего пользования.

Дальнейшее подразделение на легковые автомобили для перевозки не более десяти человек и легкие грузовики, отвечающие одному из следующих требований:

- более 10 посадочных мест;
- открытая грузовая площадка (пикапы);
- грузовой отсек больше пассажирского;
- предназначены для внедорожной эксплуатации.

Автомобильные кузова (легковые автомобили)

Основные размеры

Внутренние размеры

Размеры кузова автомобиля зависят от формы кузова, типа привода, совокупности использованного оборудования, желательных внутренних размеров, объема багажного отделения и ряда других факторов (например, комфорт, безопасность при эксплуатации) (рис. 1). Сидячие места конструируются согласно законам эргономики и с помощью манекенов или пространственных CAD-моделей (DIN, SAE, RAMSIS): манекен по стандарту DIN 33408, для мужчин (5-й, 50-й, и 95-й процентиль) и женщин (1-й, 5-й и 95-й процентиль). Например, манекен 5-го процентиля представляет собой «маленький» размер тела, т.е. только 5% населения имеет меньшие размеры тела, в то время как у 95% тела более крупные.

Манекен с точкой H SAE (Общество автомобильных инженеров) выполнен в соответствии с нормами SAE J826 (май 1987 г.): 5-й, 50-й, и 95-й процентиль – зона бедер и голеней. По установленным в ряде стран правилам, фирмы-изготовители автомобилей должны использовать манекен с точкой H для определения положения базовой точки на сиденье. Большинство автопроизводителей во всем мире используют пространственную CAD-модель RAMSIS (компьютерная антропо-математическая система для имитации пассажиров).

Точка H является центром сочленения туловища и бедра человека и приблизительно соответствует месту расположения тазобедренного сустава. Базовая точка на сиденье (в соответствии с нормами SRP, ISO 6549 и законодательством США) или точка R (ISO 6549 и Директивы ЕЕС / Правила ЕСЕ) – это положение точки H в диапазоне регулировки сиденья (на регулируемых сиденьях), с учетом точки касания каблука водителя пола (рис. 2). При определении расчетного положения точки H многие автопроизводители используют положение взрослого человека 95-го процентиля или, если это положение не достигается, то крайнее заднее положение сиденья. Для проверки положения точки H относительно автомобиля применяется трехразмерный механический манекен с изменяемым положением точки H (массой 75 кг). Базовая точка сиденья, точка контакта каблука с полом салона при положении ступни на педали газа (AHP), расстояние между этими двумя точками по горизонтали и вертикали, а также значения углов тела на манекене, установленные производителем автомобилей, формируют основу для определения размеров сиденья водителя.

Базовая точка на сиденье (точка R) используется для определения:

- эллипса перемещения глаз (SAE J941) и точек, соответствующих центрам глаз водителя (RREG 77/649), как базиса для определения переднего поля обзора водителя;
- замкнутой линии, очерчиваемой рукой водителя, позволяющей определить места установки органов управления автомобилем;
- точки контакта каблука обуви правой ноги водителя с полом при ее положении на педали газа (AHP) как базовой точки для выбора местоположения других педалей в автомобиле.

Пространство, необходимое для размещения задней оси автомобиля, а также местоположение и форма топливного бака являются основными факторами, определяющими устройство задних сидений и форму крыши кузова в его задней части. В зависимости от типа разрабатываемого автомобиля, проектируемых основных размеров и необходимых размеров пассажиров, существуют различные углы тела для двухразмерных манекенов или поз (RAMSIS) и различные расстояния между опорными точками сиденья водителя и задних сидений. Продольные размеры в значительной мере зависят от высоты сидений. Более низкие сиденья требуют увеличения пространства для их размещения и приводят к увеличению длины салона автомобиля.

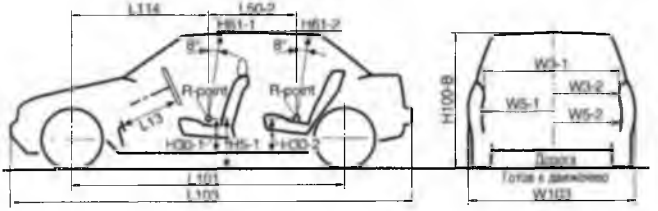
Ширина салона и, соответственно, пространство на уровне плеч, локтей и бедер, зависят от проектируемой внешней ширины, формы боковин (кривизны), и пространства, необходимого для дверных механизмов, пассивных систем безопасности и различных деталей (туннель карданного вала, система выпуска и т.д.).

Размеры багажного отделения

Размеры и форма багажного отделения зависят от конструкции задней части автомобиля, объема и местоположения топливного бака, запасного колеса, положения задней оси, размеров колесных арок и места установки глушителя.

В Германии объем багажного отделения определяется стандартом DIN ISO 3832 или,

Рис. 1. Типичные внутренние и наружные размеры
(по DIN 70020, часть 1)



Размеры	Расстояние	Субкомпактный автомобиль мм	Представительский класс мм
H5-1	от точки R до дороги спереди	460	680
H30-1	от точки R до точки касания пола спереди каблуком водителя	240	310
H30-2	от точки R до точки касания пола сзади каблуком водителя	300	315
H61-1	Полезная высота салона спереди	940	1010
H61-2	Полезная высота салона сзади	900	1010
H100-B	Габаритная высота автомобиля	1380	1660
L13	От рулевого колеса до педали тормоза	500	630
L50-2	Расстояние между точками R (на переднем и заднем сиденьях)	710	830
L101	Колесная база	2500	3000
L103	Габаритная длина автомобиля	3500	2900
L114	От центра переднего колеса до точки R спереди	1250	1600
W3-1	Ширина кузова на уровне плеч спереди	1300	1540
W3-2	Ширина кузова на уровне плеч сзади	1290	1520
W5-1	Ширина кузова на уровне бедер спереди	1300	1500
W5-2	Ширина кузова на уровне бедер сзади	1300	1500
W103	Габаритная ширина автомобиля	1630	1930

что более распространено, по методу VDA (Ассоциация немецких инженеров) с модулем VDA (параллелепипед 200 × 100 × 50 мм – соответствует 1 дм^3 объема).

Наружные размеры

При выборе наружных размеров должны учитываться следующие факторы:

- расположение сидений и багажника;
- тип и размер двигателя, трансмиссии, радиатора;
- тип и размер вспомогательного и специального оборудования;
- пространство, необходимое для установки специальных колес (цепей противоскольжения);
- тип и размеры ведущей оси;
- местоположение и объем топливного бака;

Рис. 2. Ключевые параметры дизайна кокпита автомобиля
Нормальное положение рук: нижний край кистей рук на уровне центра рулевого колеса



- расположение бамперов;
- аэродинамические характеристики автомобиля;
- клиренс (около 100–180 мм);
- требования к видимости.

Конструкция кузова

При конструировании внутренней и наружной частей кузова должны обеспечиваться:

- механические функции (открытие окон, капота, крышки багажника, раздвижной крыши);
- технологичность изготовления и простота ремонта (ширина зазоров, сборка кузова, форма окон, защитные молдинги, особенности окраски);
- безопасность (положение и форма бамперов, отсутствие острых краев);
- аэродинамика (создаваемые воздухом силы и моменты во время движения автомобиля, если они влияют на характеристики, потребление топлива и выхлоп, а также динамика и курсовая устойчивость автомобиля, аэродинамические шумы, налипание грязи на внешние панели кузова, удовольствие от езды с открытым верхом, вентиляция салона, работа дворников лобового стекла, охлаждение жидкостей, см. также рис. 3);
- оптические характеристики (исключение искажений видимых объектов, вызываемых определенными типами ветровых стекол и углом их наклона, и ослепляющего эффекта из-за светоотражения);
- требования законодательства (положение и размер фар и фонарей, зеркал заднего вида, площадок для номерных знаков);
- конструкция, расположение, форма и контуры органов управления;
- видимость крайних точек автомобиля (парковка).

Рис. 3. Влияние аэродинамики на рабочие характеристики автомобиля



Аэродинамика

Аэродинамика описывает поведение кузовов в сжимаемых средах (воздух). В производстве автомобилей аэродинамика учитывает все воздушные потоки, проходящие над, вокруг и сквозь автомобиль – их можно подразделить на влияющие и не влияющие на динамику / расход топлива, комфорт (в т.ч. аэроакустику), охлаждение, динамику / курсовую устойчивость и безопасность (см. также раздел «Конструкция кузова», рис. 3).

Силы и моменты, создаваемые воздушным потоком

В плане динамики, выхлопа и расхода топлива определяющими факторами являются коэффициент аэродинамического сопротивления c_d и площадь поперечного сечения автомобиля A. Уравнение для коэффициента аэродинамического сопротивления F_L:

$$F_L = c_d \frac{\rho}{2} v^2 A,$$

где c_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ – плотность воздуха, v - скорость движения, A – площадь поперечного сечения автомобиля.

То же самое уравнение аналогично применяется и к другим силам – подъемной F_a (часто подразделяемой на F_{aV} для передних колес и F_{aH} для задних) и силе бокового ветра F_S.

Что касается динамики и курсовой устойчивости автомобиля, интересующими воздействиями являются моменты вращения вокруг поперечной оси (момент продольной качки, M_N), вертикальной оси (M_G) и продольной оси (момент поперечной качки M_R). Опорной точкой для этих моментов служит центр автомобиля, в среднем точке колесной базы и на уровне земли. Момент вращения вокруг вертикальной оси M_G (другие моменты определяются аналогично) можно описать следующим выражением:

$$M_G = c_N \frac{\rho}{2} v^2 A l,$$

где c_N – коэффициент момента вращения вокруг вертикальной оси, ρ – плотность воздуха, v – скорость движения, A – площадь поперечного сечения автомобиля, l – колесная база.

В идеале проработка аэродинамики автомобиля проводится одновременно с созданием

Таблица 1. Факторы, влияющие на коэффициент аэродинамического сопротивления

Влияющие факторы	Δc_d [–]
Снижение габаритной высоты автомобиля на 10 мм	–0,003…–0,008
Полностью закрытое панелями днище	–0,010…–0,040
Колесные спойлеры	–0,002…–0,010
Охлаждение тормозов	+0,001…+0,005
Наружные зеркала	+0,004 …+0,020
Воздушный поток через радиатор и моторный отсек	+0,010…+0,025
Открытые окна передних дверей	+0,010…+0,020
Открытый люк	+0,005.. +0,010
Открытый верх кабриолета	+0,040…+0,060
Багажник на крыше	+0,100 …+0,120

Таблица 2. Коэффициенты аэродинамического сопротивления и фронтальные площади современных автомобилей

Категория автомобилей	Автомобиль	c_d	A м²	Автомобиль	c_d	A м²
Представительский класс	Audi A8	0,27	2,31	MB S-Class	0,26	2,40
Бизнес-класс	MB E-Class	0,25	2,21	BMW 5-серии	0,26	2,17
Средний класс	MB C-Class	0,26	2,12	BMW 3-серии	0,26	2,17
Компактный класс	BMW 1-й серии	0,29	2,09	MB A-Class	0,29	2,42
Спортивные седаны	MB SL	0,29	2,00	Porsche 911	0,28	1,94
Легкие внедорожники	Audi Q5	0,33	2,65	BMW X5	0,33	2,87

дизайн-моделей для аэродинамического влияния на форму автомобиля и обвес. Общие выводы по поводу эффективности обвеса вряд ли возможны, поскольку они зависят от исходной точки, представляемой базовым автомобилем; тем не менее, можно привести некоторые типичные примеры. В таблице 1 описаны различные конструктивные факторы, влияющие на аэродинамику.

Важность аэродинамики в настоящее время возрастает из-за ее влияния на выбросы CO_2. Современные разработки обещают значительное снижение коэффициента аэродинамического сопротивления c_d. В таблице 2 приведено несколько примеров коэффициента аэродинамического сопротивления (c_d) у современных автомобилей нескольких категорий.

Эффект изменения коэффициента аэродинамического сопротивления и массы автомобиля продемонстрирован на примере автомобиля среднего класса (Mercedes-Benz C220 CDI) в табл. 3. Хорошо виден экспоненциальный рост влияния аэродинамического сопротивления с повышением скорости. Также очевидно, что изменения аэродинамического сопротивления имеют лишь минимальный эффект на результаты NEDC (New European Driving Cycle, Новый Европейский ездовой цикл) из-за низкой средней скорости в 33,4 км/ч во время испытаний. Тем не менее, изменение c_d на –0,001 дает примерно такое же уменьшение расхода топлива, как и снижение массы на 2–3 кг (даже в условиях NEDC), а при постоянной скорости 210 км/ч, это изменение эквивалентно примерно 40 кг.

Таблица 3. Влияние изменения коэффициента аэродинамического сопротивления и массы автомобиля на динамику и расход топлива на примере автомобиля среднего класса

Разность c_d	–	База	+0.04	0	+0.04
Разность массы	кг	База	0	+100	+100
Вес, готовность к движению	кг	1,465	1,465	1,565	1,565
Масса на беговых барабанах по NEDC	кг	1,590	1,590	1,700	1,700
c_d/A	1/м^2	0,26/2,08	0,30/2,08	0,26/2,08	0,30/2,08
v_{max}	км/ч	224	215	223	214
Ускорение 0…100 км/ч	с	10,1	10,1	10,5	10,5
60…120 км/ч	с	13,3	13,5	14,1	14,3
(AG KD/VG)	Передача	5-я	5-я	5-я	5-я
Способность преодолевать подъем при 120 км/ч	%	12,2	11,8	11,4	11,1
	Передача	5-я	5-я	5-я	5-я
Расход топлива					
Городской цикл	л/100 км	8,6	8,6	8,8	8,8
Загородный цикл (EUDC)	л/100 км	5,1	5,2	5,2	5,4
Смешанный цикл (NEDC)	л/100 км	6,4	6,5	6,5	6,7
CO_2 всего	г / 100 км	169	172	172	177
Расход топлива, непрерывная езда					
90 км/ч	л/100 км	4,6	4,9	4,7	4,9
120 км/ч	л/100 км	6,0	6,4	6,1	6,5
150 км/ч	л/100 км	7,2	7,8	7,3	7,9
180 км/ч	л/100 км	9,1	9,9	9,2	10,0
210 км/ч	л/100 км	12,3	13,8	12,4	13,9

Аэроакустика

Все больше и больше внимания уделяется аспектам аэродинамики, имеющим отношение к комфорту и безопасности – особенно аэроакустике. Высокий уровень шума в салоне все чаще воспринимается как показатель плохого качества автомобиля и вызывает неудовлетворенность владельцев.

Шум ветра сильно зависит от скорости автомобиля, создавая дискомфорт, особенно на высоких скоростях. На малой скорости преобладают другие источники шума (шум шин, двигателя и пр.).

Существуют два возможных направления улучшения конструкции для снижения уровня шума:

- уменьшение интенсивности источников шума;
- оптимизация путей передачи шума пассажирам.

Попытки уменьшить шум ветра больше не ограничиваются лишь оптимизацией отдельных компонентов (таких как антенны и дверные и оконные уплотнители), они все больше направляются на дизайн кузова. Вообще говоря, для уменьшения шума ветра хорошо подходит конструкция кузова, у которой воздушный поток остается в тесном контакте с наружной поверхностью. В точках, где это невозможно (передние стойки, наружные зеркала), акцент должен делаться на создание точек плавного отделения и отвода турбулентного потока как можно дальше от поверхности кузова. Это предотвращает турбулентное присоединение воздушного потока в рамках физически возможного. Отделение и присоединение воздушных потоков, начиная со скорости около 120 км/ч, являются доминирующими источниками шума. Для минимизации передачи шума в салон должны эффективно функционировать уплотнители дверей, окон, капота и багажника. Так же важна и конструкция окон в плане толщины и слоистости структуры.

Имеется все возрастающая тенденция к проведению аэроакустических испытаний в аэродинамической трубе, а не на дороге. Операторы аэродинамических труб отреагировали на эту тенденцию строительством новых тунелей и изменением существующих, чтобы значительно уменьшить базовый уровень шума в самих туннелях. Преимуществами испытаний в аэродинамической трубе являются более высокая воспроизводимость, отсутствие влияния погодных условий и устранение других источников шума ветра. Кроме того, циклы испытаний для каждого набора условий оказываются короче, чем при испытаниях на дороге.

В прошлом традиционным средством измерения аэроакустики был спектральный анализ. Однако опыт показал, что предпочтительнее включать в испытания оценку «психоакустических» параметров (громкости, резкости и показателя артикуляции). Эти параметры измеряют высокочастотные составляющие шума, больше учитывающие субъективное восприятие (громкость, резкость) и разборчивость речи (показатель артикуляции). Интенсивность – это переменная психоакустического восприятия, которое можно измерить независимо от высоты, громкости и грубости звука. Показатель артикуляции – это мера разборчивости речи.

В таблице 4 приведены аэроакустические параметры на примере различных категорий автомобилей.

Таблица 4. Характерные аэроакустические параметры современных автомобилей (140 км/ч)

Категория автомобилей	Пример Автомобиль	Звуковое давление, дБ (А)	Громкость, сон	Резкость, acum	Индекс артикуляции, %
Представительский класс	MB S-Class	66,1	20,0	1,34	76,4
Бизнес-класс	BMW 5-й серии	66,9	21,8	1,30	68,7
Средний класс	MB C-Class	67.9	22,9	1,30	69.8
Компактный класс	MB A-Class	67.5	23.7	1,60	60.6
Легкие внедорожники	MB M-Class	67.8	23.1	1,40	70.8

Кузов

Конструкция кузова

Унифицированный кузов
(стандартная конструкция)
Унифицированный кузов состоит из листовых металлических панелей, пустотелых труб и панелей кузова, соединяемых между собой многоточечной сваркой. Отдельные детали могут также склеиваться, соединяться заклепками и свариваться лазером.

В зависимости от типа автомобиля, около 5000 сварных точек должны быть выполнены вдоль сварочных фланцев общей длиной 120–200 м. Ширина сварочного фланца составляет 10–18 мм. Другие части (передние крылья, двери, капот, крышка багажника) крепятся к опорным конструкциям кузова на болтах. Существуют также каркасные и скелетные типы конструкций кузовов.

Все чаще используется гибридная конструкция кузова, когда отдельные его компоненты изготавливаются из разных материалов согласно их функциям и требуемой грузоподъемности. К примеру, кузов, изображенный на рис. 4 (Mercedes-Benz W 211), состоит на 47% из высокопрочной стали, на 42% из стандартной стали, на 10% из алюминия и на 1% из пластика.

Общие требования, предъявляемые к конструкции кузова:

Жесткость
Должна быть как можно выше при кручении и изгибе для минимизации упругой деформации дверных проемов, проемов капота и крышки багажника. Необходимо учитывать влияние жесткости кузова на вибрационные характеристики автомобиля.

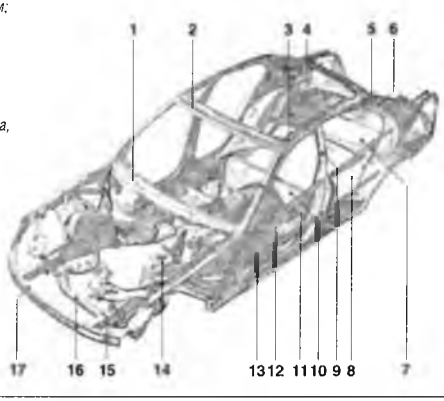
Вибрационные характеристики
Вибрации кузова оказывают негативное влияние на комфортабельность подвески и приводят к возникновению резонансных колебаний.

Частота собственных колебаний кузова и его узлов, подвергаемых вибрациям, может быть уменьшена путем изменения конфигурации отдельных элементов кузова, толщины стенок и поперечных сечений для снижения резонансных колебаний и их последствий.

Эксплуатационная надежность
Изменяющиеся нагрузки в процессе эксплуатации автомобиля со временем деформируют кузов. Схема кузова (главное в нем с точки зрения эксплуатационной надежности – монтажные точки шасси, рулевого управления и привода) должна учитывать изменяющиеся нагрузки, чтобы кузов оставался неповрежденным даже в суровых условиях эксплуатации.

Деформация кузова при аварии
В случае возникновения аварии кузов должен обеспечивать превращение как можно

Рис. 4. Конструкция кузова:
1 – балка под ветровым стеклом;
2 – балка крыши, передняя;
3 – лонжерон крыши,
4 – балка крыши задняя;
5 – задняя панель;
6 – задняя стойка;
7 – задняя часть пола и поддон для запасного колеса,
8 – лонжерон задний;
9 – средняя стойка;
10 – поперечина под задним сиденьем;
11 – передняя стойка,
12 – поперечина под сиденьем водителя
13 – порог;
14 – опора амортизатора;
15 – лонжерон передний;
16 – встроенная поперечина,
17 – поперечина передняя



большей части кинетической энергии удара в работу деформации кузова с одновременным снижением до минимума деформации салона.

Ремонтопригодность

Те элементы кузова, которые в наибольшей степени могут повреждаться в результате небольших аварий (повреждения крыльев), должны легко заменяться или ремонтироваться (облегченный доступ к наружным панелям кузова изнутри, доступ к болтовым соединениям, оптимальное расположение швов и стыков, возможность повторной окраски отдельных элементов кузова).

Материалы, используемые при изготовлении кузовов

Листовая сталь

Для кузова обычно используется листовая сталь различного качества толщиной 0,6–3,0 мм; чаще всего используется лист толщиной 0,75–1,0 мм. Из-за высоких механических свойств стали, таких как прочность и пластичность, и экономической эффективности ее применения, никакие другие материалы в качестве кузовных большого распространения не получили.

Для компонентов, подвергающихся большим нагрузкам, используется высокопрочная низколегированная сталь (HSLA). Повышенная прочность этих элементов позволяет уменьшить их толщину.

Алюминий

Используется при изготовлении отдельных частей кузова, таких как капот, крышка багажника и т.п., с целью снижения массы автомобиля.

Начиная с 1994 г., алюминиевые кузова используются в производстве одной из марок немецких легковых автомобилей представительского класса. Рама автомобиля выполняется из алюминиевых экструдированных

Таблица 5. Примеры альтернативных материалов

Типичные области применения	Материал	Сокращение	Метод обработки
Грузонесущие элементы, например, бампер, пружинная опора	Стеклопластик, армированный термопластик	PP-GMT	Литье под давлением
Элементы обвеса, например, юбка переднего бампера, спойлер, передняя часть, решетка радиатора, колесная арка облицовка, колпаки. Элементы каркаса кузова, например, капот, крылья, крышка багажника, крышка люка	Стеклопластик, армированный термопластик	PP-GMT	
	Полиуретан	PUR	RIM (реактивное литье под давлением) RRIM (усиленное реактивное литье под давлением)
	Полиамид Полипропилен Полиэтилен Акрилнитрилбутадиен-стирол Поликарбонат (с поли-бутенэфирэфталатом)	PA PP PE ABS PC-PBT	Литье под давлением, Доля стекловолокна определяет эластичность
Эластичный бампер и передние защитные молдинги	Поливинилхлорид Этилен-пропилен-эфирные полимеры Эластомер-модифицированный полипропилен	PVC EPDM PP-EPDM	Литье под давлением и экструдирование
Энергопоглощающие пеноматериалы	Полиуретан Полипропилен	PUR PP	Реакция пенообразования
Бамперы	Дуропласт с армирующими волокнами (листовая формовочная масса)	SMC	Штамповка

секций, а панельные части интегрируются как самонесущие (ASF – Audi Space Frame). Реализация этого принципа делает необходимым применение соответствующих алюминиевых сплавов, а также новых технологических процессов и специального ремонтного оборудования. Жесткость и характеристики деформации алюминия аналогичны тем, которые имеют стальные изделия, или даже превосходят их.

Пластмассы

Пластмасса заменяет сталь в ограниченном количестве случаев, в отдельных элементах кузова для снижения массы (см. табл. 5).

Поверхности кузовов

Защита от коррозии

Защиту кузова от коррозии необходимо предусмотреть еще на стадии его проектирования. Кодекс антикоррозионных мер (Канада) – соглашение, разработанное скандинавскими автопроизводителями и организациями по защите прав потребителей, и определяющее, что все автомобили, выпущенные после января 1983 года не должны иметь поверхностной ржавчины в течение трех лет и сквозной коррозии или потери структурной жесткости в течение 6 лет.

К антикоррозионным мерам относятся:

- снижение до минимума фланцевых соединений, острых кромок и углов;
- устранение зон, где могут скапливаться пыль и влага;
- выполнение отверстий для предварительной антикоррозионной обработки и обработки методом электрофореза;
- обеспечение доступности к элементам кузова для ввода ингибиторов коррозии;
- обеспечение вентиляции полостей;
- предотвращение проникновения пыли и влаги в скрытые полости; выполнение дренажных отверстий;
- снижение до минимума зон, подвергающихся воздействию ударов камней;
- исключение контактной коррозии.

Стальной листовой материал с предварительным покрытием (электролитическое цинкование, термическое цинкование) часто применяется для изготовления тех частей кузова, которые в наибольшей степени подвержены коррозии (двери и силовые элементы в передней части автомобиля). Фланцы, подверженные активному коррозионному воздействию, должны обрабатываться специальными пастами (поливинилхлорид или эпоксидная смола) в зоне расположения точечных швов (общей длиной 10-15 м на один автомобиль) перед проведением сборочных работ.

Окрашивание

Операции, осуществляемые после электрофореза:

- нанесение ПВХ-герметика на швы точечной сварки (до 90–110 м) и стыки;
- нанесение ПВХ-покрытия на днище для защиты от камней (толщиной 0,3–1,4 мм, 10–18 кг на автомобиль); в качестве альтернативы – использование пластмассовых панельных секций;
- заполнение полостей проникающим, не подверженным старению воском на водной основе;
- использование стойких к коррозии пластмассовых компонентов в областях высокого риска, таких как передний бампер (в таких местах ПВХ-покрытие не используется);
- защита днища кузова и моторного отсека после окончательной сборки автомобиля.

Элементы окончательной отделки кузова

Бамперы

Передняя и задняя части автомобиля должны быть защищены таким образом, чтобы при столкновениях или наездах с малой скоростью на препятствия отсутствовали или образовывались только незначительные повреждения кузова. Нормы США, часть 581, стандарты автомобильной безопасности Канады CMVSS 215 и стандарты ЕЭК R42 в настоящее время устанавливают минимальные требования к ударопоглощающим характеристикам бамперов и высоте их размещения на автомобиле. Требования к бамперам в США, установленные директивой US Part 581 (удар о препятствие со скоростью 4 км/ч, маятниковые испытания со скоростью 4 км/ч) и в Канаде (8 км/ч) требуют наличия в системе бампе-

Таблица 6. Толщина краски/покрытия

Нанесение краски, общая толщина	≈ 120 мкм
Цинк-фосфатное покрытие	≈ 2 мкм
Электрофоретическое эмалирование (катодное)	13 - 18 мкм
Шпатлевка	≈ 40 мкм
Краска	35 - 45 мкм
Прозрачный лак (только для краски «металлик» и краски на водной основе)	40 - 45 мкм

ров автоматически восстанавливаемых поглотителей энергии. Требования стандарта ECE (ЕЭК) удовлетворяются за счет пластмассовых деформируемых удерживающих элементов, размещаемых между гибкой штангой (бампером) и кузовом. В дополнение к листовой стали, многие гибкие детали изготавливаются из армированной пластмассы и алюминия.

Внешние отделочные панели, защитные молдинги

Пластмассы стали преобладающим материалом для изготовления наружных защитных декоративных накладок, наружных элементов отделки, кромок крыльев и спойлеров, а также тех элементов кузова, которые позволяют улучшить аэродинамические характеристики автомобиля. Критериями выбора материала являются гибкость, сохранение формы при высокой температуре, коэффициент линейного расширения, жесткость, сопротивление царапанию, химостойкость, качество поверхности и возможность окрашивания.

Стекла

Стекла в лобовом и боковых окнах обычно удерживаются посредством резиновых уплотнителей и герметизируются или крепятся клеевым составом в проеме окна. Общая масса стекол в автомобиле составляет 25–35 кг. Замена стекла пластмассой (PC, PMMA) в целях снижения массы не получила распространения из-за различных недостатков. В дверях иногда используется слоистое безопасное стекло для улучшения звуко- и теплоизоляции. Сдвижные крышки люков все чаще изготавливаются из стекла (обычно закаленного безопасного стекла).

Дверные замки

Дверные замки имеют огромную важность для пассивной безопасности при ДТП. Различные изготовители за последнее время представили ряд решений, упрощающих эксплуатацию, препятствующих кражам и повышающих безопасность при перевозке детей. К замкам предъявляются следующие требования:

ECE (ECE-R11):

Каждый замок должен иметь защелкиваемое положение и полностью закрытое положение.

- Продольная сила: замок должен выдерживать 4440 Н в защелкнутом положении, 11110 Н в полностью закрытом положении.
- Боковая сила: замок должен выдерживать 4440 Н в защелкнутом положении, 8890 Н в полностью закрытом положении.
- Инерционная сила: замок не должен выбиваться из полностью закрытого положения при боковом или продольном ускорении в 30 g, воздействующем на замок в обоих направлениях, и на боек и рабочее устройство, когда запирающий механизм не находится в зацеплении.

USA (FMVSS 206):

Каждый замок должен иметь полностью закрытое положение. Двери с петельным креплением должны иметь защелкиваемое положение.

- Продольная сила: замок должен выдерживать 4450 Н в защелкнутом положении, 11000 Н в полностью закрытом положении.
- Боковая сила: замок должен выдерживать 4450 Н в защелкнутом положении, 8900 Н в полностью закрытом положении.
- Инерционная сила: замок не должен выбиваться из полностью закрытого положения при боковом или продольном ускорении в 30 g, воздействующем на замок в обоих направлениях (на замок и рабочее устройство).

Замки багажников

(Выдержка из FMVSS 401, действует с 9.1.2002)

Настоящие Правила безопасности для легковых автомобилей с багажным отделением содержат требования к механизму отпирания багажника. Такой механизм должен позволять человеку, запертому в багажнике, самостоятельно выбраться оттуда. В соответствии с этими правилами должен быть предусмотрен механизм отпирания с ручным управлением и с дополнительной функцией, например, подсветкой или фосфоресценцией, позволяющей легко увидеть отпирающий механизм в закрытом багажнике.

Сиденья

Строгие требования, которым должны удовлетворять сиденья при возникновении аварийной ситуации, относятся к подушке и спинке сиденья, подголовнику, механизму регулировки положения сиденья и устройствам крепления сиденья к полу кузова (соответствующие требования обозначены в нормах и стандартах FMVSS 207, 202; ECE-R17, 25; RREG 74/408, 78/932 и других).

Одним из элементов активной безопасности в автомобиле является обеспечение комфорта пассажира. Сиденья должны иметь такую конструкцию, чтобы пассажиры разной комплекции могли сидеть на них длительное время, не уставая. Основные характеристики сидений:
- обеспечение опоры для отдельных частей тела пассажира;
- обеспечение боковой поддержки при движении на повороте;
- соблюдение климатических условий;
- возможность пассажира изменять свое положение на сиденье без регулировки самого сиденья;
- хорошие антивибрационные и демпфирующие характеристики;
- возможность регулирования положений подушки, спинки и подголовника сиденья.

На вышеуказанные характеристики оказывают влияние следующие факторы:
- размеры и форма обивки подушки и спинки сиденья;
- распределение коэффициента жесткости по зонам сиденья;
- общий коэффициент жесткости и демпфирующая способность подушки сиденья;
- удельная теплопроводность и способность к абсорбции влаги обивки и чехлов сиденья;
- диапазон регулировок, осуществляемый регулировочным механизмом сиденья.

Отделка салона

Отделка салона состоит из выполненной по необходимому размеру внутренней части (листовая сталь, листовой алюминий или пластмасса) с расположенным на ней металлическим крепежом и амортизирующим удары пеноматериалом (например, полиуретаном) и гибкого поверхностного слоя. Также применяются пластиковые отделочные секции, изготовленные из термопластика методом литьевого прессования.

Обшивка потолка изготавливается либо из натяжного полотна, либо крепится заклепками. Используемые материалы должны быть пламезамедляющими и медленно горящими (FMVSS 302).

Безопасность

Активная безопасность автомобиля

Цель активной безопасности - предотвращение ДТП. Безопасность управления автомобилем – результат гармоничной конструкции подвески, рулевого управления, тормозов и выбора оптимальных динамических характеристик автомобиля.

Условная безопасность вытекает из минимизации физиологических напряжений, которым подвергаются пользователи автомобиля (колебания, шум, климатические условия). Это важный фактор для снижения вероятности неадекватных действий за рулем.

Колебания в пределах диапазона частот 1–25 Гц (преодоление неровностей, неустойчивость движения и т.п.), наводимые колесами, воздействуют на пользователей автомобиля непосредственно через кузов, сиденье и рулевое колесо. Эффект этих вибраций более или менее резко выражен, в зависимости от их направления, амплитуды и длительности.

Шум, создаваемый в виде акустических помех внутри и вокруг автомобиля, может исходить из внутренних (двигатель, трансмиссия, карданные валы, оси) или внешних (шины на дороге, шум ветра) источников и передается по воздуху или через конструкцию. Уровень звукового давления измеряется в дБ(А).

Меры по уменьшению шума, с одной стороны, связаны с разработкой бесшумно работающих компонентов, а с другой – с использованием изолирующих или звукопоглощающих материалов.

Основными климатическими факторами являются температура воздуха, влажность воздуха, скорость воздушного потока и давление воздуха.

Безопасность движения, связанная с факторами восприятия

Меры, которые повышают уровень безопасности движения, связанные с факторами восприятия, в основном, сосредоточены на следующих компонентах:
- освещение;
- звуковая сигнализация;
- прямая и косвенная видимость (обзор водителя: угол бинокулярного затемнения (т.е. для обоих глаз водителя), вызываемого передними стойками, не должен превышать 6 градусов).

Безопасность эксплуатации
Низкий уровень стресса у водителя и, таким образом, более высокая степень безопасности управления автомобилем требуют обеспечения оптимальных конструктивных особенностей для обстановки вокруг водителя с точки зрения удобного пользования средствами управления автомобилем.

Пассивная безопасность автомобиля
Цель пассивной безопасности – смягчить последствия ДТП.

Внешняя безопасность автомобиля
Термин охватывает все меры, относящиеся к автомобилю, которые предназначены для минимизации тяжести ранения пешеходов, велосипедистов и мотоциклистов во время наезда на них в результате ДТП. Определяющими факторами являются поведение автомобиля при деформации и внешняя форма кузова.

Первоначальной целью конструкторов является проектирование такого автомобиля, чтобы его внешняя форма способствовала минимизации последствий основных видов ДТП (столкновения, наезды и повреждение самого транспортного средства).

Самые серьезные травмы пешеходы получают при ударе о переднюю часть автомобиля или о дорогу, кроме того, точные последствия ДТП сильно зависят от размера кузова. Последствия столкновения с участием двухколесного транспортного средства и легкового автомобиля могут быть уменьшены лишь конструктивными мерами, которые, применительно к легковому автомобилю, включают, например, следующие особенности дизайна, которые можно реализовать в легковом автомобиле:
- убираемые фары;
- утопленные очистители ветрового стекла;
- заделанные заподлицо с панелями сточные желобы;
- утопленные дверные ручки;
- деформируемая передняя часть автомобиля, в том числе капот.

См. также ECE-R26, RREG 74/483, 2003/102/EC, 2004/90/EC.

Безопасность интерьера автомобиля
Понятие «внутренняя безопасность» охватывает меры, цель которых – минимизация ускорения и сил, воздействующих на пассажиров при ДТП, обеспечение достаточного запаса выживаемости и сохранение работоспособности компонентов, имеющих важнейшее значение для извлечения пассажиров из автомобиля после ДТП. Определяющими факторами обеспечения безопасности пассажиров являются:
- деформационное поведение кузова;
- длина пассажирского салона, объем пространства для выживания во время и после возникновения столкновения;

Рис. 5. Безопасность дорожного движения
Понятия и факторы



- удерживающие системы;
- область воздействия в салоне (FMVSS 201);
- система рулевого управления;
- извлечение пассажиров из салона;
- противопожарная защита.

Законы, регулирующие внутреннюю безопасность (лобовые и боковые удары):
- защита пассажиров в случае ДТП, в частности с помощью удерживающих систем пассивной безопасности (FMVSS 208, дополненная версия, FMVSS 214, ЕЭК R94, ECE R95, критерии ранения);
- установка ветрового стекла (FMVSS 212);
- проникновение ветрового стекла в салон автомобиля (FMVSS 219);
- крышки отделений для вещей (FMVSS 201)
- предотвращение утечек топлива (FMVSS 301).

Деформационное поведение кузова автомобиля

При испытании на лобовое столкновение автомобиль, движущийся со скоростью 48,3 км/ч, наезжает на неподвижный предмет, перпендикулярный или наклоненный под углом до 30° по отношению к продольной оси автомобиля. На рис. 6 показано распределение типов столкновений для ДТП, приводящих к травмам пешеходов. Источник: GIDAS, German In-Depth Accident Study (исследовательский проект BASt и FAT).

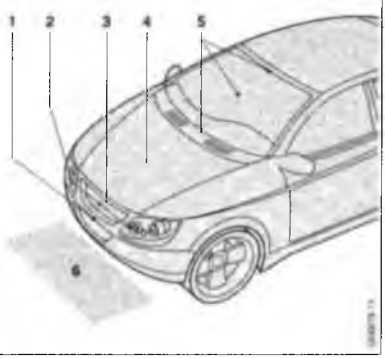
Так как практически 50% всех лобовых столкновений в основном затрагивают лишь половину передней части автомобиля, то во всем мире выполняется смещенный лобовой удар с покрытием от 30 до 50% ширины автомобиля.

Выдержка из ECE-R 94: «Барьер должен иметь такую конфигурацию, чтобы автомобиль сначала коснулся его той стороной, с которой находится водитель. Если испытание можно провести с автомобилем либо с правым, либо с левым рулем, то его нужно провести с самым неблагоприятным типом рулевого управления, установленным техническим органом, ответственным за испытания».

Во время лобового столкновения кинетическая энергия рассеивается во время деформации бампера, передней части автомобиля, а при тяжелых столкновениях – передней части пассажирского салона (перегородка моторного отсека). Оси, колеса и двигатель ограничивают длину деформации. Однако для минимизации ускорения салона требуется адекватная длина деформации и смещения узлов привода. В зависимости от конструкции, размера и массы автомобиля,

Рис. 6. Риск для пешеходов при столкновении с легковыми автомобилями
Частота случаев для контактных зон, вызывающих травмы, согласно GIDAS (2006); 100% соответствуют 2,338 травмам

№ на рисунке	Площадь автомобиля	Процент случаев
1	Передний бампер	15%
2	Решетка радиатора, фары и крылья	3%
3	Край капота	3%
4	Капот	11%
5	Ветровое стекло с балками	18%
6	Дорога перед автомобилем (вторичный удар)	37%
-	Прочее	11%
-	Неизвестно	2%



лобовое столкновение с неподвижным препятствием при скорости 50 км/ч приводит к величине деформации передней части автомобиля приблизительно в 0,4–0,7 м. Повреждение салона должно быть минимизировано. Это касается, в основном:

- зоны перегородки между салоном и моторным отсеком (смещение системы рулевого управления, приборной панели, педалей, сжатие перегородки в зоне ног);
- днища кузова (снижение уровня или изменение наклона сидений);
- боковой части (возможность открывания дверей после ДТП).

Измерение величин ускорений и анализ высокоскоростной видеосъемки позволяют точно определять деформационные характеристики. Для имитации водителя и пассажиров используются манекены различных размеров, позволяющие измерять ускорение головы, шеи, грудной клетки и бедер.

Боковое столкновение, как следующий наиболее часто встречающийся вид ДТП, вызывает высокую степень тяжести последствий для водителей и пассажиров, что связано с ограниченной демпфирующей способностью и высокой степенью деформирования интерьера автомобиля.

На риск получения ранения в значительной степени оказывают влияние конструктивная прочность боковых элементов кузова, несущая способность поперечных элементов пола и сидений, а также конструкция внутренних дверных панелей (FMVSS 214 и 301, ЕЭК R95, европейская программа NCAP и US - SINCAP). Дополнительные подушки безопасности в дверях или сиденьях и потолке имеют значительный потенциал уменьшения риска травмирования.

В испытаниях с ударом сзади деформация салона должна быть незначительной. Должна сохраняться возможность открывания дверей, край крышки багажника не должен проникать через заднее стекло в салон; должна сохраняться целостность топливного бака (FMVSS 301).

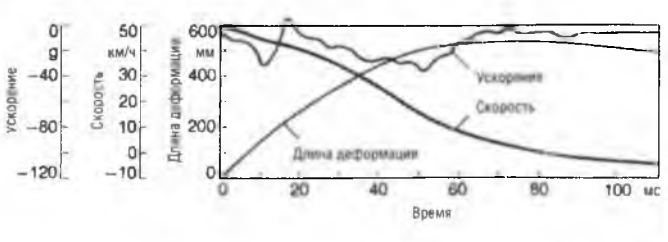
Потолочные структуры исследуются с помощью испытаний на опрокидывание и квазистатических испытаний крыши при ударе (FMVSS 216).

Кроме того, некоторые изготовители подвергают свои автомобили испытаниям на падение с опрокидыванием, чтобы проверить прочность крыши (пространство выживания) в экстремальных условиях (автомобиль падает с высоты 0,5 м на левый передний угол крыши).

Общая безопасность

Активная и пассивная безопасность все теснее переплетаются, так как в обоих типах безопасности используют системы датчиков. Вот почему разрабатывается все больше систем, которые лучше подготавливают пассажиров к потенциальному ДТП (например, Pre-Safe).

Рис. 7. Ускорение, скорость и длина деформации пассажирского салона при наезде на препятствие на скорости 50 км/ч



Кузова транспортных средств (коммерческие автомобили)

Классификация

Типы автомобилей

Коммерческие автомобили используются для безопасной и экономичной перевозки людей и грузов. В этом отношении степень экономической эффективности определяется отношением полезного пространства к общему объему автомобиля и отношением полезной нагрузки к его полной массе. Размеры и масса ограничены нормативными законодательными актами.

Широкий спектр типов автомобилей отвечает потребностям локальных и междугородных перевозок, а также требованиям, предъявляемым на стройплощадках и в особых областях применения (примеры на рис. 1).

Конструкция

Из-за широкого спектра типов автомобилей процесс расчета размеров кузовов (унифицированного кузова, салона, шасси и т.д.) имеет большую важность уже на самых ранних стадиях проектирования. На опыте сравнимых автомобилей определяются эталоны конструкции (массовые серии, самые неблагоприятные варианты) путем моделирования и расчетов на основе постепенно улучшаемых моделей по методу конечных элементов (FEM) или с помощью моделирования нескольких кузовов (MKS). Таким образом, жесткость, эксплуатационную пригодность, вибрационные, акустические характеристики, поведение при краш-тесте соответствующих вариантов кузовов можно в существенной степени узнать вычислительными методами, еще до начала испытаний. При расчете кузовов также учитываются требования (международных) стандартов безопасности.

Рис. 1. Обзор коммерческих автомобилей *(примеры):*
a – легкий автофургон; b – фура; c – автопоезд; d – автопоезд большой грузоподъемности; e – седельный автопоезд (Европа), f – седельный автопоезд (NAFTA); g – автобус

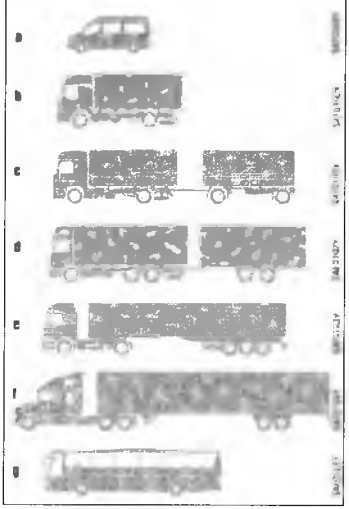


Рис. 2. Легкий автофургон, несущая конструкция

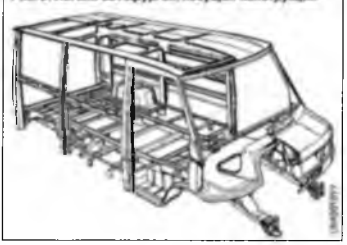
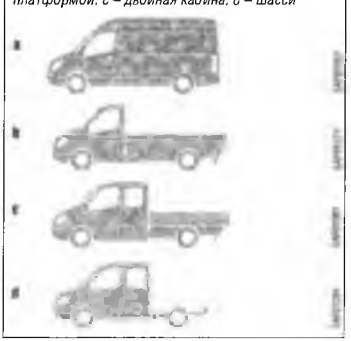


Рис. 3. Обзор малотоннажных фургонов *(примеры):*
a – панельный фургон, b – фургон с безбортовой платформой; c – двойная кабина; d – шасси



Легкие коммерческие автомобили

Области применения

Коммерческие автомобили малой грузоподъемности (2–7 т) используются для местных перевозок людей, товаров и грузов. Легкие грузовики с более мощными двигателями все больше используются и в паневропейских перевозках на дальние расстояния (экспресс-доставка, ночная доставка). В обоих случаях предъявляются жесткие требования к маневренности, динамике, комфорту и безопасности эксплуатации.

Варианты кузовов легких коммерческих автомобилей

Конструктивная концепция основывается на переднем расположении двигателя, приводе на передние или задние колеса, независимой или зависимой подвеске, полной массе 3,5 т и более, сдвоенных колесах на задней оси.

Линейка продукции включает в себя универсальные грузовые автофургоны с закрытым кузовом и автомобили с кузовами-платформами, а также грузовики с низкорамными и высокорамными платформами со специальными надстройками и кабинами для экипажа (см. примеры на рис. 3).

В легких грузовиках (полной массой до 6 т), кузова вместе с шасси образуют цельнометаллический грузовой блок (рис. 2). Кузов и рама шасси состоят из элементов из штампованных металлических листов и профилей, как у легковых автомобилей.

Легкие автофургоны с кузовами платформенного типа имеют лестницеобразную раму с открытыми или закрытыми лонжеронами и поперечинами в качестве первичной несущей конструкции (аналогичную тяжелым грузовикам, см. следующий раздел, рис. 6).

Более крупные автофургоны обычно имеют отдельное шасси, как у крупнотоннажных грузовиков (см. следующий раздел). Они имеют отдельный кузов, а кабина, из соображений комфорта и уменьшения шума, обычно крепится к раме на гибкой подвеске и таким образом частично изолируется от вибраций шасси.

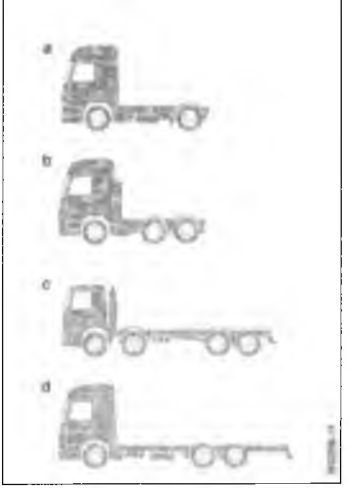
Коммерческие автомобили средней и большой грузоподъемности и автомобили-тягачи

Конструкция

В этом секторе грузовых автомобилей широко распространено разделение между несущим шасси и частично несущим кузовом. Максимальные размеры и максимально допустимая масса регламентируются законодательными нормами, иногда значительно различающимися от страны к стране. К примеру, в Европе максимальные размеры в отношении общей длины и длины полуприцепа изложены в Директиве 96/53/EU. В зоне NAFTA ограничивается лишь длина полуприцепа, но не общая длина.

В большинстве случаев двигатель расположен спереди или под полом между осями. Автомобиль приводится через одну или несколько осей со сдвоенными шинами. В отдельных случаях задняя ось имеет одинарную ошиновку. Для строительных работ при движении по бездорожью используются

Рис. 4. Типы грузовых шасси *(примеры):*
a – 4×2 (четыре колеса, два из них ведущие);
b – 6×2/4 (шесть колес, два из них ведущие, четыре управляемые);
c – 8×6/4 (восемь колес, шесть из них ведущие, четыре управляемые);
d – 6×2 (шесть колес, два из них ведущие)



автомобили со всеми ведущими колесами с межосевой и межколесной блокировкой дифференциалов и повышенным тяговым усилием.

Типы шасси

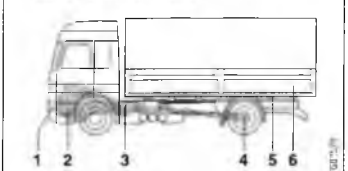
Типы грузового шасси (рис. 4) обозначаются как N × Z/L, где N обозначает количество колес, Z – количество ведущих колес, а L – количество управляемых колес (сдвоенные считаются как одно). Если L не указано (например, 4 × 2), то автомобиль имеет два управляемых колеса.

Шасси

Обычно ходовая часть имеет рессорную или пневматическую подвеску, передний и задний мосты. Пневматическая подвеска уменьшает ускорение кузова (повышение комфортабельности езды, уменьшение деформации груза, повышение плавности хода) и позволяет легко переставлять сменные кузова (например, контейнеры) и отсоединять полуприцепы.

Трехосные автомобили (6 × 2) конструируются с подкатным мостом, расположенным спереди или сзади приводного моста в целях повышения полезной нагрузки. Обладающие хорошей тягой грузовики 6 × 4 для строительства часто имеют две скомбинированных оси, образующих подрессоренную тандемную тележку. Нагрузка на эти две оси компенсируется механически посредством расположенной между ними центральной точки приложения нагрузки. В случае с некомбинированными пневматически подрессоренными одиночными осями нагрузка на оси обычно компенсируется пневматически путем изменения жесткости пневматической подвески отдельных осей.

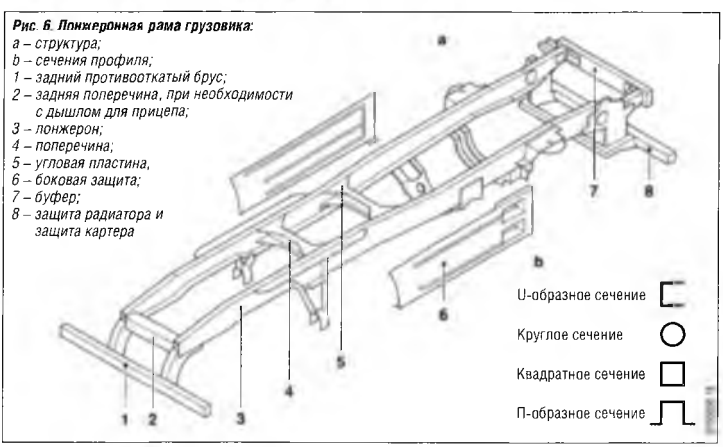
Рис. 5. Агрегаты грузового автомобиля:
1 – кабина, 2 – двигатель, 3 – трансмиссия, 4 – ось; 5 – шасси, 6 – кузов



Рамы

Рама – это несущий элемент грузового автомобиля, к которому крепится кузов и на котором размещается кабина (рис. 5). Рама имеет лонжеронную конструкцию и состоит из продольных и поперечных элементов (рис. 6). Размеры продольных и поперечных элементов выбираются так, чтобы выдерживать жесткие условия эксплуатации и требования к грузоподъемности (легкие и тяжелые грузовые автомобили), а также с учетом стоимости и массы. Выбор профилей разных сечений (количество и толщина) определяет уровень жесткости на кручение. Крутильно-гибкие рамы являются

Рис. 6. Лонжеронная рама грузовика:
a – структура;
b – сечения профиля;
1 – задний противооткатый брус;
2 – задняя поперечина, при необходимости с дышлом для прицепа;
3 – лонжерон;
4 – поперечина;
5 – угловая пластина,
6 – боковая защита;
7 – буфер;
8 – защита радиатора и защита картера



предпочтительными для грузовых автомобилей средней и большой грузоподъемности, поскольку они облегчают работу подвески на неровной дороге. Крутильно-жесткие рамы более подходят для грузовых автомобилей и автофургонов, имеющих небольшие размеры.

Помимо мест приложения нагрузки, критическими местами конструкции рамы являются участки соединения боковых и поперечных элементов (рис. 7). Специальные пластины для соединения или отштампованные концы поперечных элементов образуют широкое основание соединения. Узловые соединения крепятся заклепками, болтами и при помощи сварки. Дополнительное усиление в специфических точках осуществляется посредством вставок в виде уголка или швеллера.

Рама также служит для размещения широкого спектра навесных деталей – топливных баков, держателей аккумуляторных батарей, воздушных баллонов, системы выпуска ОГ, запасного колеса. Здесь конфигурация зависит от области применения. Специальные установки, такие как подъемные краны и платформенные подъемники, тоже монтируются на раму для соответствующих областей применения.

Кабина водителя

Существует ряд вариантов кабины, зависящих от концепции автомобиля. В конструкции кабины на автомобилях по доставке небольших партий грузов и автомобилях-фургонах должен быть предусмотрен низкий удобный вход. На транспортных средствах, предназначенных для дальних перевозок, наиболее важным будет обеспечение достаточного внутреннего пространства и комфорта. Модульная концепция конструкции позволяет создавать укороченные, средние и удлиненные версии кабин и в то же самое время сохранять те же размеры передней, задней частей и дверей.

Кабина соединяется с рамой через подвеску. Различают комфортабельные и стандартные подвески с различными комбинациями пружин и амортизаторов или поперечными листовыми рессорами с частотой собственных колебаний 1–6 Гц.

С точки зрения конструкции различаются автомобили с кабиной над двигателем (COE) и с кабиной позади двигателя (CBE) (рис. 8). В транспортных средствах с расположением кабины над двигателем (COE) перегородка моторного отсека и система рулевого управления размещаются справа в передней части автомобиля. Двигатель находится под высоко расположенной кабиной (специальная кабина с плоским полом для движения на дальние расстояния) или под туннелем между водителем и напарником. Вход в кабину находится (несколько дискомфортно) перед или выше передней оси. Механический (предварительно скрученный торсионный стержень) или гидравлический механизм подъема кабины обеспечивает достаточно хороший доступ к двигателю.

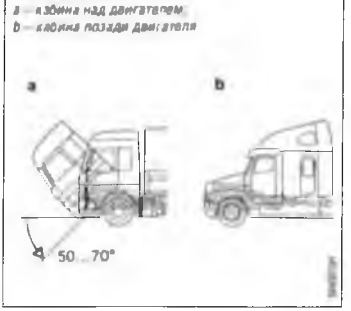
В грузовом автомобиле с кабиной, позади двигателя (CBE) силовой агрегат расположен перед интерьером кабины, ниже стального или пластикового капота. Водитель заходит в кабину за передней осью.

Стандарты, которым должна соответствовать кабина в плане аэродинамики, выбора материалов, коррозии и оборудования те же, что и стандарты для кузовов легковых автомобилей

Рис. 7. Соединения элементов рамы:
a – с отштампованным концом поперечины;
b – с U-образной поперечиной; 1 – лонжерон;
2 – поперечина; 3 – угловая пластина



Рис. 8. Кабина водителя
a – кабина над двигателем;
b – кабина позади двигателя



Конструкции кузовов

Специализированные конструкции кузовов, такие, как бортовая платформа, стандартный фургон, кузов типа «фургон», грузовой автомобиль с низкой платформой, автомобиль-цистерна, бетоносмеситель и т.п., позволяют осуществлять экономичные и эффективные перевозки разнообразных грузов и материалов. Кузов и несущая рама иногда соединяются посредством вспомогательных рам с неположительными или положительными креплениями. Для соединения рамы (которая обычно имеет низкую прочность на кручение) с жестким кузовом требуются особые конструктивные элементы (например, подрессоренные крепления в передней части кузова).

Автопоезда и тягачи с полуприцепами используются в перевозках на дальние расстояния (рис. 1). По мере увеличения размера транспортного средства уменьшаются затраты на перевозку груза. Грузовой объем возрастает при уменьшении пространства между кабиной, платформой и прицепом (автопоезд большой грузоподъемности, рис. 1, d). Преимущества седельных автопоездов заключаются в использовании большей грузовой площади и в более эффективном применении тягачей. Меры улучшения аэродинамики, такие, как передняя и боковая отделка кузова автомобиля и специальные аэродинамические отражатели, расположенные между кабиной и кузовом, могут успешно применяться для минимизации расхода топлива.

Рис. 9. Обзор автобусов *(примеры):*
a – микроавтобус; b – мини- и средний автобус; c – городской автобус, d – туристический автобус



Автобусы

На рынке автобусов предлагаются варианты практически для любой области применения. Благодаря наличию автобусов самых разных типов с широким диапазоном различий по размеру (длине, высоте, ширине) и назначению, рынок автобусов предлагает эти транспортные средства практически для любой области применения (рис. 9).

Типы автобусов

Микроавтобусы

Перевозят приблизительно до 20 пассажиров. Выпускаются на базе развозочных коммерческих автомобилей или автофургонов полной массой до 4,5 т.

Мини- и средние автобусы

Автобусы, предназначенные для перевозки до 25 человек, называются мини- или средними автобусами. Четкой грани между миниавтобусами и средними автобусами не существует. В большинстве своем они разрабатываются на базе развозочных коммерческих автомобилей или автофургонов полной массой до 7,5 т. Они иногда строятся на шасси легких автофургонов с лонжеронной рамой, либо используется унифицированная цельнометаллическая структура. Измененная конструкция подвески и специальное исполнение кузова (например, с гибкими креплениями) позволяют обеспечить оптимальный комфорт для пассажиров и снизить уровень шума.

Городские автобусы

Автобусы этого типа совершают поездки на регулярных маршрутах и имеют салон с местами для проезда пассажиров сидя и стоя. Небольшие расстояния между остановками на городских и пригородных маршрутах требуют быстрой посадки-высадки пассажиров. Это достигается наличием широких быстро открывающихся и закрывающихся дверей, низкой высотой ступенек (около 320 мм) и низким расположением пола (около 370 мм).

Основные технические данные стандартного городского автобуса:

- длина – приблизительно 12 м;
- допустимая полная масса – 18 т;
- количество сидений – 32–44;
- вместимость – приблизительно 105 пассажиров.

Использование двухэтажных автобусов (длиной 12 м, вместимостью приблизительно 130

пассажиров), трехосных автобусов (длиной до 15 м, вместимостью приблизительно 135 пассажиров) и сочлененных автобусов (вместимостью приблизительно 160 пассажиров) позволяет увеличить провозную способность автобусных маршрутов.

Междугородные автобусы

В зависимости от области применения (перевозка стоя не разрешается на скорости более 60 км/ч), используются конструкции с низким полом и низкой посадкой (как в городских автобусах) или с высоким полом и небольшими багажными отделениями (очень похожие на туристические). Междугородные автобусы имеют длину 11–15 м (18 м – для сочлененных автобусов).

Туристические автобусы

Предназначены для комфортного сообщения на средние и дальние расстояния. По конструкции они различаются от низких двухосных стандартных автобусов до двухэтажных междугородных автобусов-люкс с отдельной кабиной для водителя и имеют длину от 10 до 15 м.

Конструкция кузова

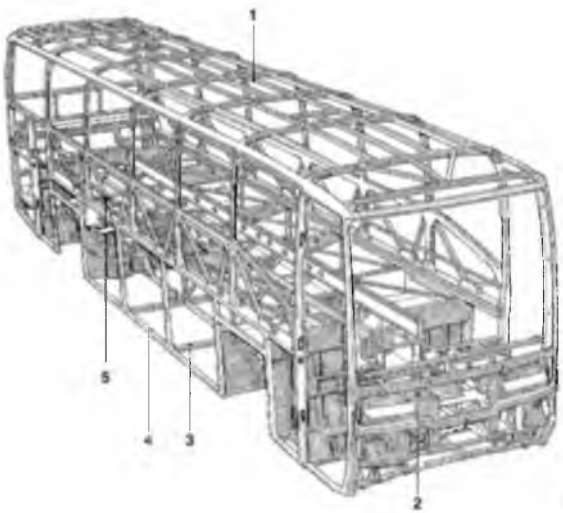
Облегченная конструкция на основе несущего кузова (цельнометаллическая структура): рамы кузова и основания, прочно сваренные вместе, состоят из штампованных элементов решетчатого типа и прямоугольных труб (рис. 10).

В случае с шасси, кузов располагается на несущей лонжеронной раме (как у тяжелых грузовиков). За исключением мини- и средних автобусов эта конструкция редко встречается в Европе.

Системы шасси

Горизонтально или вертикально расположенный двигатель устанавливается сзади и служит приводом заднего моста. Пневматическая подвеска всех осей обеспечивает достаточный уровень устойчивости во время движения и высокий комфорт. Междугородные и экскурсионные автобусы, в основном, оборудованы передней независимой подвеской. На всех осях автобуса применяются дисковые тормоза (часто в тормозных системах используются тормоза-замедлители).

Рис. 10. Унифицированный кузов автобуса:
1 – рама кузова; 2 – штампованные детали, 3 – рама основания, 4 – трубы прямоугольного сечения; 5 – решетчатые несущие элементы



Пассивная безопасность грузовых автомобилей

Пассивная безопасность призвана ограничить последствия ДТП и защитить других участников движения. Систематическая регистрация ДТП, исследования грузовиков, попавших в ДТП, и интенсивная компьютерная оптимизация помогают разработать меры безопасности.

Требования

Вообще говоря, должна быть продемонстрирована эффективность и прочность систем удерживания водителя и пассажиров. Поэтому при расчете размеров кузовов грузовых автомобилей должны учитываться такие аспекты, как прочность и жесткость точек крепления ремней безопасности на сиденьях и соответствующих элементов кузова (полозья сидений, пол, рама и т.д.).

В случае возникновения ДТП кабина водителя и пассажирский салон должны сохранять необходимое пространство для выживания водителя и пассажиров, и в то же самое время уровень замедления не должен превышать чрезмерных значений. Существует ряд решений этой проблемы, зависящих от концепции автомобиля.

Для грузовых автомобилей по доставке товаров и автофургонов передняя часть конструкции должна включать средства демпфирования энергии, как это предусмотрено для легковых автомобилей. Несмотря на более короткие пути деформации и более высокий уровень высвобождаемой энергии, физиологически допустимые пределы не превышаются практически ни одного показателя краш-тестов легковых автомобилей (требования законодательства и стандартные испытания).

У легких автофургонов должны быть также обеспечены функции, предотвращающие травмирование пассажиров из-за неконтролируемого движения груза. Статическая и динамическая прочность таких функций (перегородки, клетки и сети) должна быть просчитана математически или определена путем испытаний.

В грузовых автомобилях боковые элементы, проходящие до переднего бампера, могут поглощать высокие значения сил, действующих в продольном направлении. Такие меры пассивной безопасности основаны на анализе ДТП и призваны улучшить конструкцию кабины. Испытания на статические и динамические напряжения, ударную прочность передней и задней поверхностей кабины, а также на воздействие таких нагрузок на крышу позволяют моделировать напряжения, получаемые во время реальных столкновений. Они описаны в Правилах ECE R29, но прохождение этих испытаний как условие сертификации требуется лишь в немногих европейских странах.

Статистический анализ данных о ДТП показывает, что самым безопасным средством перевозки пассажиров является автобус. Статические испытания крыши под нагрузкой и испытания с динамическим опрокидыванием свидетельствуют о прочности кузова. Использование пламезамедляющих и самогасящихся материалов для оборудования пассажирского салона сводит риск пожара к минимуму.

Поскольку в дорожном движении участвует много разных типов автомобилей, то столкновения между легкими и тяжелыми автомобилями неизбежны. В результате разности масс транспортных средств и несовместимости геометрии автомобилей и конструктивной прочности риск получения ранения в автомобиле небольшого размера значительно выше.

Скорость Δv при центральном пластичном ударе для лобовых столкновений или столкновений при движении в одном направлении (автомобиль 1 и автомобиль 2) определяется как

$$\mu = \frac{m_2}{m_1},\ \Delta v_1 = \frac{\mu v_r}{1+\mu},\ \Delta v_2 = \frac{v_r}{1+\mu},$$

где m_1 и m_2 – массы автомобилей, v_r – относительная скорость до удара.

Боковые, передние и задние защитные средства, препятствующие подъезду под автомобиль, позволяют уменьшить опасные условия, при которых более легкий автомобиль попадает под более тяжелое транспортное средство. Иными словами, они призваны защитить других участников дорожного движения (рис. 11).

Литература

[1] Hoepke, E. and others: Nutzfahrzeugtechnik. Vieweg + Teubner, 5th Edition, 2008.



Рис. 11: Задний противоотказный брус, устанавливаемый на грузовом автомобиле

Освещение

Функции

Освещение на автомобиле появилось с момента его изобретения. Сначала это были свечи, затем начали использовать керосиновые и карбидные лампы; сегодня эти лампы можно было бы классифицировать как габаритные огни. Лишь с появлением автомобильной электрики в виде генератора Bosch в модели автомобиля Adler (1913) изготовители смогли представить системы с хорошей дальностью освещения, ставшие прообразом современных фар. Другими важными этапами были:

- получение асимметричной картины ближнего света фар, которая характеризуется (при правостороннем движении автомобилей) растянутым визуальным диапазоном вдоль правой стороны дороги (1957);
- появление новых систем фар, имеющих сложные геометрические конфигурации (PES, полиэлипсоидная система, поверхности произвольной формы, многогранные отражатели) и позволивших повысить эффективность освещения на 50% (1985);
- система фар Litronic с газоразрядными лампами (ксеноновые лампы со светящейся дугой), дающих более чем вдвое больше света по сравнению с аналогичными галогеновыми лампами (1990);
- системы адаптивного освещения (AFS) с движущимися, динамическими PES-модулями (полиэлипсоидная система) или статическими, активируемыми отражателями для поворота (2003).

Освещение в передней части автомобиля

Основной функцией фар головного света является освещение дороги, с тем чтобы водитель мог видеть транспортную обстановку и в нужное время выявлять на дороге любые препятствия и опасности. Головные фары также служат для обнаружения автомобиля водителями транспортных средств, движущихся навстречу. Фонари указателей поворотов информируют водителей других транспортных средств о намерениях изменить направление движения или о наличии опасных ситуаций.

К головным фарам и другим световым приборам относятся:

- фары ближнего света;
- фары дальнего света;
- противотуманные фары;
- дополнительные лампы;
- фонари указателей поворота;
- стояночные фонари;
- габаритные фонари (для широких автомобилей);
- дневные ходовые огни (если этого требуют законы отдельных стран).

Освещение в задней части автомобиля

Приборы освещения, расположенные в задней части автомобиля, включаются в соответствии с погодными условиями и служат для указания местоположения автомобиля.Они также информируют о характере и направлении движения автомобиля (например, движение по прямой с торможением или без, либо намерение водителя изменить направление движения, либо сообщение о существовании опасной ситуации). Фонари заднего хода освещают дорогу при движении автомобиля задним ходом или при разворотах.

К лампам, расположенным в задней части автомобиля, относятся:

- лампы сигнала торможения;
- задние фонари;
- задние противотуманные фонари;
- лампы указателей поворота;
- стояночные фонари;
- габаритные фонари;
- лампы света заднего хода;
- лампы освещения номерного знака.

Освещение в салоне автомобиля

При разработке системы освещения салона предпочтение отдается надежности работы и легкости доступа к выключателям, а также качеству обеспечения водителя достаточной информацией о рабочем состоянии автомобиля (с минимально возможной степенью отвлечения водителя от процесса вождения автомобиля). Эти приоритеты диктуют необходимость эффективно освещенных панелей приборов и дискретного освещения для различных секторов управления (таких как акустические и навигационные системы), где они удовлетворяют главному требованию – расслабленное и безопасное управление автомобилем. В зависимости от потребности могут применяться различные оптические и звуковые сигнализаторы для водителей.

Правила, стандарты и оборудование

Коды и символы сертификации, Европа/ЕЭК
Использование автомобильных приборов освещения подчиняется национальным и международным нормам, в соответствии с которыми эти приборы должны изготовляться и испытываться. Для каждого типа осветительного оборудования существует специальный код и символ, который должен быть нанесен на оборудование и быть хорошо читаемым. Предпочтительно наносить коды и символы на такие места, чтобы при открытом капоте они были хорошо видны – такие как рассеиватели фар и других ламп, а также детали блоков фар. Это положение также применимо к заменяемым фарам и приборам освещения.

Если на каком-то компоненте освещения имеется такой код или символ, это значит, что он проверен технической инспекцией (например, в Германии – это Институт осветительных технологий Университета Карлсруэ) и сертифицирован лицензионным органом (в Германии – Федеральное бюро автотранспорта). Все приборы серийного производства, на которые нанесен специальный код или символ, должны во всех аспектах соответствовать принятым нормам. Примеры символов:

(E1) – знак сертификации ЕЭК (ECE), [e1] – знак сертификации ЕС (EU).

Цифра 1 после буквы означает проведенное типовое испытание и сертификацию согласно Правилам ЕЭК (Европейской экономической комиссии) для Германии с признанием во всей Европе. В Европе установка всех приборов освещения автомобиля и визуально воспринимаемых сигнализаторов подчиняется не только национальным нормативным предписаниям, но также и общеевропейским нормам (ЕЭК: вся Европа, ЕС, Новая Зеландия, Австралия, ЮАР и Япония). В условиях происходящего объединения Европы введение норм в значительной мере упрощается путем гармонизации директивных предписаний и принятых законов.

Правостороннее или левостороннее движение
Правила ЕЭК аналогичным образом применяются к право- и левостороннему движению. Технические требования к освещению зеркально отображаются вокруг центрального перпендикуляра окна испытаний (см. рис. 3). Согласно Венской Конвенции 1968 года, при передвижении по странам, где транспорт движется по противоположной стороне дороги, все участники движения обязаны принять меры по предотвращению ослепления встречного транспорта ночью из-за асимметричности светового пучка. Этого можно добиться либо с помощью наклеивания специальных полосок, предоставляемых автопроизводителями, либо с помощью двухпозиционных выключателей в фарах (в случае с PES).

Правила для США
В США приборы освещения соответствуют нормам, которые в значительной степени отличаются от принятых в Европе. Принцип собственной сертификации продукции заставляет каждого производителя, выступающего в качестве импортера приборов освещения, гарантировать, а в особых случаях и приводить доказательства того, что его продукция на 100% соответствует FMVSS 108 [27] (Федеральному стандарту по безопасности движения транспортных средств), изложенному в Федеральном Реестре. Единый порядок утверждения приборов освещения в США отсутствует. Стандарт FMVSS 108 частично основывается на промышленном стандарте SAE.

Модернизация и конверсия
Автомобили, импортируемые в Европу из других регионов, должны подвергаться модификациям, чтобы соответствовать европейским директивам. Это, в частности, относится к осветительному оборудованию. В качестве прямой замены можно использовать идентичные компоненты, предлагаемые для европейского рынка. Другие решения, такие как изделия из розничной торговли и, в некоторых случаях, оставление оригинального оборудования, требуют инженерного заключения. В Германии ст. 22a StVZO (Правила регистрации транспортных средств) [1] предписывает наличие «Сертификатов приближения» для осветительного оборудования. Такие сертификаты выдаются Институтом осветительных технологий Университета Карлсруэ.

Последующие изменения сертифицированных фар и патронов ламп аннулируют сертификацию и, следовательно, общий допуск автомобиля к эксплуатации.

Источники света

В отношении автомобильных источников света различают термолюминесцентные излучатели (термоизлучатели) и электролюминесцентные излучатели. Внешние электронные оболочки атомов могут поглощать определенное количество энергии путем возбуждения (потребление энергии). Переход оболочки с более высоких на более низкие энергетические уровни каждый раз сопровождается выделением кванта света.

Тепловые излучатели

Энергетический уровень кристаллографической системы повышается за счет тепловой энергии. Эмиссия является непрерывной в широком диапазоне длин волн. Общая излучаемая мощность пропорциональна 4-й степени абсолютной температуры (закон Стефана-Больцмана). С ростом температуры максимум кривой распределения смещается в сторону более коротких длин волн (закон смещения Вина) [39].

Лампы накаливания

Лампы накаливания с вольфрамовыми нитями (температура плавления 3660 К) также являются тепловыми излучателями. Испарение вольфрама и последующее неблагоприятное потемнение колбы лампы ограничивают срок ее службы.

Галогенные лампы

Галогенный наполнитель (йод или бром) в лампе позволяет поднять температуру нити до близкой к температуре плавления вольфрама. Ближе к нагретой стенке колбы испаряющийся вольфрам соединяется с газонаполнителем, образуя галогенид вольфрама – газообразное вещество, передающее световые лучи и стабильное в диапазоне температур от 500 до 1700 К. Поступая к нити накаливания благодаря конвекции, оно распадается под действием высокой температуры и образует на нити накаливания равномерный вольфрамовый осадок. Для поддержания этого процесса внешняя температура колбы должна быть около 300 °С. Стенка колбы, изготавливаемая из кварцевого стекла, должна располагаться вблизи нити накала. В колбе можно создавать высокое давление наполнения, затрудняющее испарение вольфрама.

Газоразрядные лампы

Газоразрядные лампы являются электролюминесцентными излучателями и отличаются более высокой световой эффективностью. Возбуждение атомов, испускаемых газом, сопровождается столкновениями, происходящими между электронами и атомами газа. Атомы, возбуждаемые во время этого процесса, отдают свою энергию в виде светового излучения. Газоразрядные лампы отличаются повышенной светоотдачей.

Примеры газоразрядных ламп: флюоресцентные лампы (освещение интерьера), натриевые лампы низкого давления (уличное освещение) и фары транспортных средств (Litronic).

Светодиоды

Светодиод или LED является электролюминесцентной лампой. Благодаря своей прочности, высокой энергетической эффективности, быстрому отклику и компактности светодиоды используются как источники света и подсветки в широком спектре областей. Они используются в салонах автомобилей для освещения, в качестве индикаторов и для подсветки дисплеев. Снаружи светодиоды устанавливаются, в частности, в дополнительных фонарях стоп-сигналов и задних фонарях и с дальнейшим ростом их световой отдачи могут все больше использоваться в лампах, применяемых в передней части автомобиля.

Автомобильные лампы

Сменные лампы накаливания для систем освещения автомобилей должны быть сертифицированы согласно ECE R37 [10], сменные газоразрядные источники света – в соответствии с ECE R99 [19]. Другие источники света, не отвечающие этим требованиям (светодиоды, неоновые трубки, специальные лампы) могут использоваться, но устанавливаться должны как фиксированный компонент лампы или «световой модуль».

Лампы, отвечающие требованиям ECE R37, обычно бывают рассчитаны на 12 В, некоторые лампы могут быть рассчитаны на 6 В и 24 В (табл. 1). Во избежание путаницы различные типы ламп идентифицируются формами цоколя. У ламп с одинаковым цоколем, но с разным рабочим напряжением должна быть маркировка напряжения. Подходящий тип лампы в любом случае должен обозначаться на световом оборудовании.

Повышение напряжения у галогенных ламп на 10% сокращает срок службы на 70% и увеличивает световой поток на 30% (рис. 1, [40]).

Световая отдача показывает уровень фотометрического к. п. д. лампы и является одним из основных параметров лампы. Для ламп без галогенного эффекта светоотдача находится в пределах 10–18 лм/Вт. Более высокая светоотдача галогенных ламп, составляющая 22–26 лм/Вт, в основном является следствием повышенной температуры нитей накала. Газоразрядные лампы обеспечивают уровень световой отдачи порядка 85 лм/Вт в целях существенного улучшения характеристик ближнего света фар.

Сегодня световая отдача светодиодов достигает порядка 50 лм/Вт (светодиоды с высоким энергопотреблением) или 100 лм/Вт (светодиоды с низким энергопотреблением). В ближайшие несколько лет ожидается увеличение световой отдачи на 25%.

Рис. 1. Влияние рабочего напряжения на некоторые параметры галогенных ламп *(Источник: [40])*
L – срок службы (ширина рассеяния во время работы с пониженным напряжением обусловлена наличием галогена); U – рабочее напряжение; I – ток лампы; P – выходная мощность лампы, Ф – световой поток



Функции фар

Ближний свет фар

Основной свет для движения ночью обеспечивают лампы ближнего света. Создание характерного разграничения света и тени было одним из технологических прорывов в осветительной технике.

Схема распределения светового потока типа «вверху темнее, внизу светлее», вытекающая из разграничения света и тени, дает приемлемые визуальные диапазоны для всех условий управления автомобилем. При такой схеме ослепление, которому подвергаются водители встречного транспорта, удерживается в разумных пределах, хотя в то же время одновременно обеспечивается относительно высокая световая отдача в зоне ниже светотеневой линии.

Картина распределения света должна сочетать максимальные визуальные диапазоны с минимальным эффектом ослепления. Эти требования дополняются необходимостью обеспечения зоны освещенности непосредственно впереди автомобиля. Например, фары должны оказывать помощь во время совершения поворота, то есть схема распределения света должна простираться за левые и правые края дорожного покрытия.

Дальний свет фар

Лампы дальнего света освещают дорогу на максимальную дальность. Это создает большую силу света, в зависимости от расстояния, воздействующую на все предметы в зоне, выделенной для движения транспорта. Поэтому включать дальний свет разрешается только тогда, когда не происходит ослепления встречного транспорта.

Высокая плотность транспортного потока на современных дорогах серьезно ограничивает использование дальнего света.

Правила, стандарты и оборудование

Конструкции

Мировые нормы и правила регламентируют обязательное наличие двух фар ближнего света и, по крайней мере, двух (или, как вариант, четырех) – дальнего света для всех двухколейных транспортных средств. Свет фар должен быть белым.

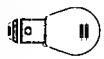
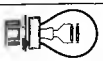
Система сдвоенных фар

В системе сдвоенных фар (рис. 2, а) используются лампы с двумя источниками света (галогенные лампы с двойной нитью (H4),

Таблица 1. Спецификации основных ламп транспортных средств (кроме мотоциклов)

Применение	Категория	Напряжение, номинальные значения В	Мощность, номинальные значения, Вт	Световой поток, опорные значения лм	Тип цоколя IEC	Изображение
Противотуманные фары, дальний свет, ближний свет в 4 HL	H1	6 12 24	55 55 70	1350[2] 1550 1900	P 14.5 s	
Противотуманные фары, дальний свет	H3	6 12 24	55 55 70	1050[2] 1450 1750	PK 22s	
Дальний свет, ближний свет	H4	12 24	60/55 75/70	1650/ 1000[1] [2] 1900/1200	P 43 t - 38	
Дальний свет, ближний свет (наклоненный луч) в 4 HL, противотуманные фары	H 7	12 24	55 70	1500[2] 1750	PX 26 d	
Противотуманные фары, статичные фары для освещения поворотов	H8	12	35	800	PGJ 19-1	
Дальний свет фар	H9	12	65	2100	PGJ 19-5	
Ближний свет, противотуманные фары	H11	12 24	55 70	1350 1600	PGJ 19-2	
Противотуманные фары	H10	12	42	850	PY 20 d	
Дальний свет, лампы дневного света	H15	12 24	55/15 60/20	260/1350 300/1500	PGJ 23t-1	
Ближний свет (наклоненный луч) в системах 4 HL	HB4	12	51	1095	P 22 d	
Дальний свет фар в системах 4 HL	HB3	12	60	1860	P 20 d	
Ближний свет, дальний свет	D1S	85 12[5]	35 около 40[5]	3200	PK 32 d-2	
Ближний свет, дальний свет	D2S	85 12[5]	35 около 40[5]	3200	P 32 d-2	
Ближний свет, дальний свет	D2R	85 12[5]	35 около 40[5]	2800	P 32 d-3	

Таблица 1 (продолжение) Спецификации основных ламп транспортных средств (кроме мотоциклов)

Применение	Категория	Напряжение, номинальные значения В	Мощность, номинальные значения, Вт	Световой поток, опорные значения лм	Тип цоколя IEC	Изображение
Стоп-сигналы, указатели поворотов, задние противотуманные фонари, фонари заднего хода	P 21 W PY 21 W[6]	6, 12, 24	21	460[3]	BA 15 s	
Стоп-сигнал/ задний фонарь	P 21/5 W	6 12 24	21/5[4] 21/5 21/5	440/35[3], [4] 440/35[3], [4] 440/40[3]	BAY 15d	
Габаритный огонь, Задний фонарь	R 5 W	6 12 24	5	50[3]	BA 15 s	
Задний фонарь	R 10 W	6 12 24	10	125[3]	BA 15 s	
Лампы дневного света	P 13 W	12	13	250[3]	PG 18.5 d	
Стоп-сигнал, указатель поворота	P 19 W PY 19 W	12 12	19 19	350[3] 215[3]	PGU 20/1 PGU 20/2	
Задний противотуманный фонарь, фонарь заднего хода, передний указатель поворота	P 24 W PY 24 W	12 12	24 24	500[3] 300[3]	PGU 20/3 PGU 20/4	
Стоп-сигнал, указатель поворота, задние противотуманные фары, фонари заднего хода	P 27 W	12	27	475[3]	W 2,5 x 16 d	
Стоп-сигнал/ задний фонарь	P 27/7 W	12	27/7	475/36[3]	W 2,5 x 16 q	
Подсветка номерного знака, задний фонарь	C 5 W	6 12 24	5	45[3]	SV 8.5	
Габаритный свет	H 6 W	12	6	125	BAX 9 s	
Габаритный свет, подсветка номерного знака	W 5 W	6 12 24	5	50[3]	W 2,1 x 9,5 d	
Габаритный свет, подсветка номерного знака	W 3 W	6 12 24	3	22[3]	W 2,1 x 9,5 d	

[1] Дальний/ближний свет. [2] Спецификации при испытательном напряжении 6,3, 13,2 или 28,0 В.
[3] Спецификации при испытательном напряжении 6,75, 13,5 или 28,0 В. [4] Основная/вторичная нить накала
[5] С балластным сопротивлением [6] Вариант с желтым светом

в США - неразборные фары) для дальнего и ближнего света с общими отражателями. В фарах с газоразрядными лампами двойная функция достигается путем фокусирования или расфокусирования ксеноновой горелки в общем отражателе. В биксеноновых фарах имеется экран, который убирается из траектории луча либо вдвигается в нее.

Система с четырьмя фарами
В системе с четырьмя фарами одна пара ламп обеспечивает дальний и ближний свет, а вторая – только дальний (рис. 2, b). Функции освещения проекционных и отражательных систем можно использовать в любой комбинации. Фары ближнего света можно дополнительно комбинировать с противотуманными фарами (рис. 2, c).

Важные конструктивные определения
Сгруппированная конструкция
Различные рассеиватели и лампы, размещенные в одном корпусе.
Пример:
– блоки задних фар с отдельными секциями.

Комбинированная конструкция
Ламповый узел в корпусе с более чем одним рассеивателем.
Пример:
– комбинированный задний фонарь и лампа освещения номерного знака.

Совмещенная конструкция
Общие корпус и рассеиватель с отдельными лампами.
Пример:
– блок-фара с вложенной позиционной лампой.

Функции основного освещения для Европы

Правила и директивы для Европы
Наиболее важные правила и директивы приведены в ECE R112 [20], ECE R113 [21], ECE R48 [12], 76/756/EEC [24], ECE R98 [18] и ECE R123 [23].
– ECE R112: фары для асимметричного ближнего и/или дальнего света с лампами накаливания или светодиодными модулями (легковые и грузовые автомобили, автобусы).
– ECE R113: фары для симметричного ближнего и/или дальнего света с лампами накаливания или светодиодными модулями (мопеды, мотоциклы).
– ECE R48 и 76/756/EEC: установка и применение;
– ECE R98: фары с газоразрядными лампами по ECE R99.
– ECE R123: системы адаптивного освещения (AFS) для автомобилей.

Описанные ниже правила установки относятся к легковым автомобилям.

Рис. 2. Системы фар:
a – система двойных фар;
b – система с четырьмя фарами;
c – система с четырьмя фарами с дополнительными противотуманными фарами

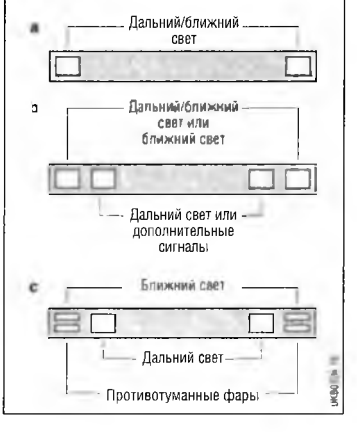


Рис. 3. Вид измерительного экрана с точками измерения освещенности с требованиями Европы/ЕЭК
a – перспектива дороги с точки зрения водителя;
b – точки измерения относительно перспективы дороги согласно ECE R 112

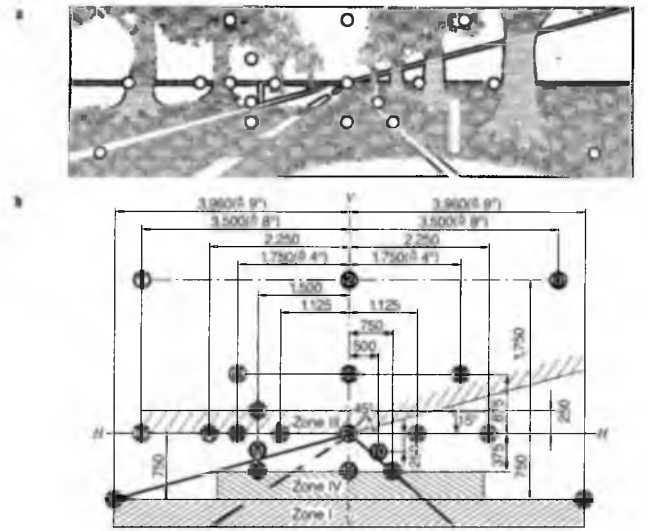


Таблица 2. Точки измерения ближнего и дальнего света фар

Ближний свет				**Дальний свет**		
Точки измерения			Освещенность	Точки измерения		Сила света
№	Правостороннее движение	Левостороннее движение	Класс B (лк)	№	Точка	Класс B (лк)
01	8L/4U		≤0,7		E_{max}	48 < E <240
02	V/4U		≤0,7			
03	8R/4U		≤0,7	F1	$E_{H\text{-}5,15°}$	>6
04	4L/2U		≤0,7	F2	$E_{H\text{-}2,55°}$	>24
05	V/2U		≤0,7	F3	E_{HV}[8]	≥0,8 E_{max}
06	4R/2U		≤0,7			
07	8L/H	8R/H	≥0,1; ≤0,7	F4	$E_{H+2,55°}$	>24
08	4L/H	4R/H	≥0,2; ≤0,7	F5	$E_{H+5,15°}$	>6
09	B50L	B50R	≤0,4			
10	75R	75L	≥12			
11	75L	75R	≤12			
12	50L	50R	≤15			
13	50R	50L	≥12			
14	50V	50V	≥6			
15	25L	25R	≥2			
16	25R	25L	≥2			
Любая точка в зоне III			≤0,7			
Любая точка в зоне IV			≥3			
Любая точка в зоне I			≤2E[1)]			

Для ближнего света.
Сумма 1 + 2 + 3 ≥ 0,3 лк
Сумма 4 + 5 + 6 ≥ 0,6 лк

[1)] E – текущее измеренное значение в точке 50R или 50L

Ближний свет фар, установка
Правилами предписывается установка двух фар ближнего белого света для многоосных транспортных средств (рис. 4).

Ближний свет фар, осветительная техника
Эффективность автомобильных фар зависит от технической оценки и проверки перед запуском в серийное производство. Среди требований – минимальный (для обеспечения адекватной видимости дороги) и максимальный (во избежание ослепления) уровни силы света (см. точки измерения и освещенность фар, рис. 3 и табл. 2).

Сертификационные испытания проводятся в лабораторных условиях с помощью испытательных ламп, изготовленных с более точными допусками, чем устанавливаемые на автомобили. Лампы включаются с заданным испытательным световым потоком для каждой категории ламп. Лабораторные условия применяются ко всем фарам, но лишь в ограниченной степени учитывают специфику отдельных автомобилей, например, монтажную высоту фары, электропитание автомобиля и регулировку.

Ближний свет фар, переключение
Все фары дальнего света должны гаситься немедленно, когда включаются фары ближнего света. Допустимым является постепенное уменьшение силы света (постепенная деактивация) с максимальным периодом 5 с. Для предотвращения уменьшения силы света при использовании автоматических переключателей фар требуется двухсекундная задержка отклика. Когда включаются фары дальнего света, фары ближнего света могут продолжать работать (одновременное функционирование). Лампы H4 обычно подходят для коротких периодов использования с одновременной работой обеих нитей накала.

Дальний свет фар, установка
В режиме дальнего света должны функционировать минимум две и максимум четыре фары. Правилами предписывается наличие индикаторной лампы (голубой или желтой) дальнего света на приборном щитке.

Дальний свет фар, осветительная техника
Генерируется посредством источника света, расположенного в фокусе отражателя (рис. 5), направляющего свет наружу вдоль плоскости, параллельной оси отражателя. Максимальная сила дальнего света в значительной степени является функцией площади светящейся поверхности отражателя. В четырех- и шестифарных системах, в частности, параболоидные отражатели дальнего света могут быть заменены средствами освещения со сложной геометрической «составной» схемой получения дальнего света. Расчеты, используемые при проектировании этих систем, предполагают достижение такого распределения дальнего света, которое бы согласовывалось с распределением ближнего света (одновременная активация). Чистый дальний свет «накладывается», как если бы он был на проекции ближнего света. От досадной области перекрытия рядом с передней частью автомобиля в этом случае мы избавляемся.

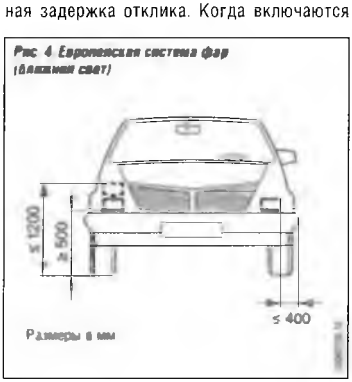


Рис. 4. Европейская система фар (ближний свет)

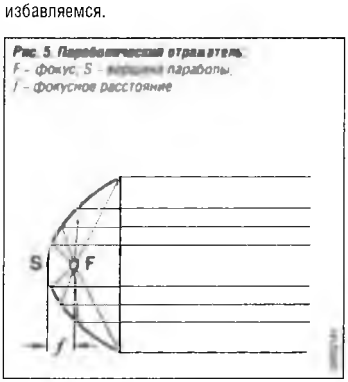


Рис. 5. Параболический отражатель. F – фокус, S – вершина параболы, f – фокусное расстояние

Распределение дальнего света фар определяется общими правилами с теми, что предписаны для использования ближнего света фар.

Максимально допустимая величина суммы номинальных значений силы света всех фар дальнего света, устанавливаемых на автомобиль, составляет 430 000 кд. Это значение силы света обозначается эталонными кодами, расположенными рядом с кодом омологации на каждой фаре. Величина 430 000 кд соответствует числу 100. Сила света для фар дальнего света должна также проставляться, например, число 25 наносится вслед за круглым символом испытаний ЕЭК. Если это единственные фары на автомобиле, то тогда суммарная сила света должна находиться в кодовом отношении 50/100 от 430 000 кд, а именно 215 000 кд.

Дополнительные лампы

Дополнительные лампы используются для дополнения эффективности дальнего света в стандартных фарах дальнего света.

Дополнительные лампы устанавливаются и регулируются так же, как и стандартные лампы, и лежащая в их основе технология такая же. Для дополнительных ламп также регламентирована максимальная сила света в автомобильных системах освещения; сумма эталонных чисел всех установленных в автомобиле ламп не должна превышать 100. У более старых фар без сертификационных номеров для общей оценки используется число 10.

Функции основного освещения для США

Правила и стандарты

Национальным стандартом в США является Федеральный стандарт автомобильной безопасности (FMVSS) No.108 [27] и Справочник по стандартам автомобильного освещения SAE (Стандарты и рекомендуемые практики), на который он ссылается.

Нормы, с помощью которых регулируются установка и цепи управления для фар, сравнимы с европейскими. С 1.05.1997 фары с разграничениями света и тени разрешены и в США, но требуют ручной регулировки. Сейчас стало возможным создание фар, которые бы удовлетворяли как американским, так и европейским требованиям.

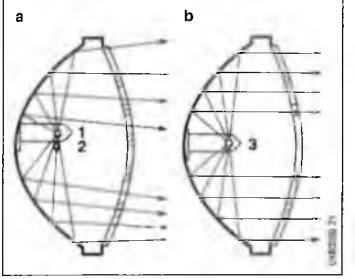
Как и в Европе, в США используются системы с двумя и четырьмя фарами. Установка и использование противотуманных фар и дополнительных фар дальнего света регламентируется целым рядом локальных законов в 50 штатах, иногда сильно различающихся между собой.

До 1983 года допустимые размеры герметизированных ламп-фар (рис. 6) в США были следующими.

Системы сдвоенных фар:
- диаметром 178 мм (круглые);
- размером 200 × 142 мм (прямоугольные).

Системы с четырьмя фарами:
- диаметром 146 мм (круглые);
- размером 165 × 100 мм (прямоугольные).

Рис. 6. Американские герметизированные лампы-фары:
а – ближний свет; b – дальний свет; 1 – нить накала ближнего света; 2 – фокальная точка; 3 – нить накала дальнего света (в фокальной точке)



Ближний свет фар, осветительная техника

Требования к световому пятну в США в большей или меньшей степени степени отличаются от европейских в зависимости от типа конструкции. В частности, минимальный уровень ослепления в США выше, а максимальная ширина пучка ближнего света находится ближе к автомобилю. Базовая настройка обычно выше (см. точки измерения на рис. 7 и в табл. 3).

Дальний свет фар

Конструкция фар дальнего света такая же, как и в Европе. Имеются различия в ширине рассеяния светового пучка и, кроме того, меньше максимальное значение на оси фары дальнего света.

Рис. 7. Вид измерительного экрана с точками измерения освещенности в соответствии с требованиями США:
a – перспектива дороги с точки зрения водителя,
b – точки измерения относительно перспективы дороги согласно FMVSS 108 (выдержка)

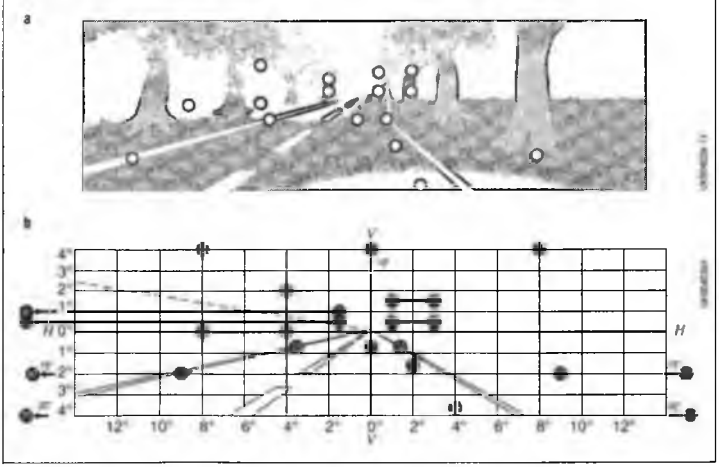


Таблица 3. Точки измерения ближнего света фар

№	Точки измерения	Сила света (кд)
01	10U-90U	≤ 125
02	4U, 8L	≥ 64
03	4U, 8R	≥ 64
04	2U, 4L	≥ 135
05	1 5U, 1R-3R	≥ 200
05	1.5U, 1R-R	≤ 1400
06	1U, 1 5L-L	≤ 700
07	0.5U, 1 5L-L	≤ 1000
08	0.5U, 1R-3R	≥ 500; ≤ 2700
09	H, 4L	≥ 135
10	H, 8L	≥ 64

№	Точки измерения	Сила света (кд)
11	0.6D, 1.3R	≥ 10 000
12	0.86D, V	≥ 4500
13	0 86D, 3.5L	≥ 1800, ≤ 12 000
14	1 5D, 2R	≥ 15 000
15	2D, 9L	≥ 1250
16	2D, 9R	≥ 1250
17	2D, 15L	≥ 1000
18	2D, 15R	≥ 1000
19	4D, 4R	≥ 12 500
20	4D, 20L	≥ 300
21	4D, 20R	≥ 300

Конструкции

Конструкция лампы-фары

В этой конструкции, которая больше не используется (см. рис. 6), нити накала располагаются внутри лампы-фары, стеклянный отражатель должен быть герметично соединен с рассеивателем. После герметизации блок-фара наполняется инертным газом. При перегорании нити лампа-фара полностью заменяется. Лампы-фары также бывают с галогенными лампами.

Диапазон применения ламп-фар значительно ограничен, поскольку требования разработчиков относительно вариаций стиля передней части моделей автомобилей весьма разнообразны.

Устройство для регулировки автомобильных фар (VHAD)

Это устройство предназначено для регулировки фар со сменными лампами по вертикали с помощью водяных уровнемеров, встроенных в каждую фару, и по горизонтали с помощью системы, состоящей из иглы и круговой шкалы. На самом деле это равноценно «бортовой регулировке».

Фары для визуальной регулировки (VOL / VOR)

Эти системы используются с 1997 года. Это фары со сменными лампами, у которых ближний свет имеет границу света и тени, позволяющую регулировать их визуально (это стандарт в Европе).

Используется либо левая горизонтальная граница света и тени (на фаре должна быть надпись VOL), либо что чаще встречается в США, правая горизонтальная граница света и тени (на фаре должна быть надпись VOR). Примечательным в американских системах является положение границы света и тени, находящееся гораздо ближе к горизонту (в зависимости от типа наклон составляет 0,4–0 %). Это увеличивает потенциальный риск ослепления.

Этот тип фар не предусматривает горизонтальной регулировки.

Термины и определения

Фотометрические термины и определения

Дальность света фары

Это расстояние, на котором световой луч продолжает обеспечивать заданную освещенность, в большинстве случаев – 1 люкс, с правой стороны дороги (при правостороннем движении).

Геометрическая дальность фары

Это расстояние до горизонтальной части границы света и тени на дорожном покрытии (см. табл. 4). Угол наклона фар ближнего света порядка 1% или 10 см на 10 м является результатом геометрического диапазона, равного 100-кратной высоте установки фар (замеряется между центром отражателя и дорожным покрытием).

Визуальная дальность

Визуальная дальность – это расстояние, на котором все еще видны объекты (автомобили, предметы и т.п.) в пределах яркостного распределения зрительного поля человека.

Ввиду того, что визуальный диапазон подвержен влиянию таких факторов, как форма, размер и отражательная способность предмета, тип дорожного покрытия, конструкция фар и их чистота, а также физиологические условия состояния глаз водителя, не имеется возможности установить визуальный диапазон путем использования точных числовых средств. При крайне неблагоприятных условиях (при левостороннем движении, с левой стороны мокрой дороги) визуальная дальность может снизиться до 20 м и ниже. При оптимальных условиях она может увеличиться до более чем 100 м (при правостороннем движении, с правой стороны дороги).

Дискомфортный свет

Представляет собой количественное сокращение степени визуальной оценки, которое происходит в ответ на источники света, создающие ослепляющий эффект. Примером может быть уменьшение дальности видимости при взаимном приближении двух автомобилей.

Дискомфортный свет возникает, когда источник ослепления вызывает дискомфорт, однако без фактического уменьшения характеристики визуальной оценки. Дискомфортный свет оценивается по шкале, определяющей разные уровни комфорта и дискомфорта.

Технические особенности

Фокусное расстояние отражателя

Стандартные отражатели для фар и других автомобильных ламп обычно являются параболическими по форме (рис. 5). Фокусное расстояние *f* (расстояние от вершины параболы до точки фокусировки) составляет 15–40 мм.

Отражатели произвольной формы

Геометрические конфигурации отражателей произвольной формы создаются посредством сложных математических расчетов (HNS, однородная вычисленная поверхность). Здесь небольшое среднее фокусное расстояние *f* определяется относительно расстояния между вершиной отражателя и центром нити накаливания. Обычно оно составляет 15–25 мм.

У отражателей, разделенных ступенями или гранями, каждая перегородка может иметь собственное среднее фокусное расстояние *f*.

Зона освещения отражателя

Это параллельная проекция всего отверстия отражателя на поперечную плоскость. Стандартная эталонная плоскость перпендикулярна направлению движения автомобиля.

Эффективный световой поток, эффективность фары

Эффективный световой поток представляет собой ту часть светового потока источника света, которая в состоянии предоставить эффективное освещение посредством отражающих или преломляющих компонентов (например, подобно тому, как свет проектируется на дорожное покрытие посредством отражателя фары). Отражатель с коротким фокусным расстоянием делает эффективным использование ламп накаливания и имеет высокую эффективность, потому что отражатель выходит наружу, окружая лампу и позволяя ей преобразовать большую часть светового потока в полезный световой луч.

Углы геометрической видимости

Определяются относительно оси осветительного устройства, создающего полную видимую освещаемую поверхность.

Варианты конструкции фар

Компоненты

Отражатель

Отражатели направляют свет от источника либо прямо на дорогу (система отражения), либо на промежуточную плоскость, которая затем проецируется линзой (система проецирования). Отражатели изготавливаются из пластмассы, листовой стали либо отливаются из металла.

Пластмассовые отражатели изготовляются путем литья под давлением (термоусадочная пластмасса), обеспечивающего значительно более точное воссоздание геометрии, чем процесс глубокой вытяжки. Достигаемые геометрические допуски находятся в пределах 0,01 мм. Кроме того, можно создавать отражатели со ступенями и любыми распределениями граней. Материал основания не требует защиты от коррозии.

Литье под давлением обычно выполняется из алюминия, иногда из магния. Преимуществами являются высокая термостойкость и способность создавать формы с высокой степенью сложности (фигурные патроны, резьбовые отверстия и контакты).

Поверхности термоусадочного пластмассового и литого металлического отражателей сначала окрашиваются из распылителя или порошковой краской, и затем на них наносится слой алюминия толщиной 50 - 150 нм. Защиту алюминия от окисления обеспечивает еще более тонкий прозрачный слой.

Отражатели из листовой стали изготавливаются методом глубокой вытяжки и с помощью вырубного штампа. Затем наносится порошковая краска. Она герметично закрывает металл и придает поверхности отличную гладкость. На создаваемый таким образом базовый слой, как и в случае с другими отражателями, наносится слой алюминия.

Рассеиватель

Изготавливается из высокочистого стекла (свободного от пузырьков и полос). В процессе изготовления приоритет должен отдаваться качеству поверхности в целях предупреждения нежелательной, направленной вверх, рефракции луча, поскольку это будет вызывать ослепление водителей встречного транспортного потока. Тип и форма линз и призм зависят от необходимой схемы светораспределения.

Прозрачные рассеиватели, используемые в современных фарах, обычно изготавливаются из пластмассы. Кроме уменьшения массы изделия, пластиковые рассеиватели обеспечивают большую широту охвата в различных конструкциях автомобильных фар. Примерно с 2007 года также используются многоцветные пластмассовые рассеиватели (2-компонентные рассеиватели), края которых окрашиваются другим цветом, обычно черным или серым. Преимуществом является то, что конструкция распыляющих инструментов не требует внутренних направляющих и, следовательно, на видимой глазу поверхности не появляется разделительных линий. Также удается избежать рассеивания света от краев.

Есть несколько причин, по которым не следует вытирать пластмассовые рассеиватели сухой тряпкой:

- несмотря на стойкость покрытия к царапинам, протирание сухой тряпкой может повредить поверхность рассеивателя;
- протирание сухой тряпкой может создать электростатический заряд рассеивателя, из-за которого на его внутренней поверхности может скапливаться пыль.

Варианты фар

Отражательные фары

У традиционных систем фар с практически параболическими отражателями (рис. 5 и рис. 8), качество ближнего света повышается прямо пропорционально размеру отражателя. В то самое время геометрический диапазон действия фары увеличивается с ростом высоты ее установки.

Эти факторы должны использоваться с учетом предписаний аэродинамики, в соответствии с которой передняя часть профиля автомобиля должна быть насколько возможно низкой. В этих обстоятельствах с увеличением размера отражателя увеличивается ширина фары.

Отражатели заданного размера, но с различными фокусными расстояниями имеют разные исполнения. Короткие фокусные расстояния более эффективны и выдают более широкие световые лучи с лучшим близким диапазоном и боковым освещением. Это может быть особо полезным на поворотах.

Специально разработанные программы освещения (CAL, компьютерное управление освещением) позволяют реализовать бесконечное количество форм отражателей с непараболическими секциями и отражателей с гранями.

Фары с отражателями типа HNS

В случае с гранями поверхность отражателя делится на сегменты, и каждый сегмент оптимизи-

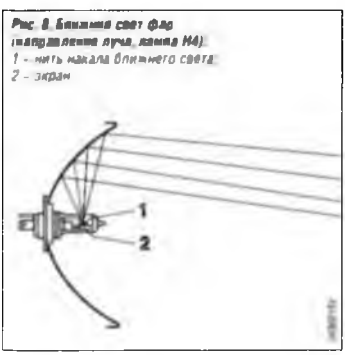


Рис. 8. Ближний свет фар (направление луча, камня H4)
1 – нить накала ближнего света
2 – экран

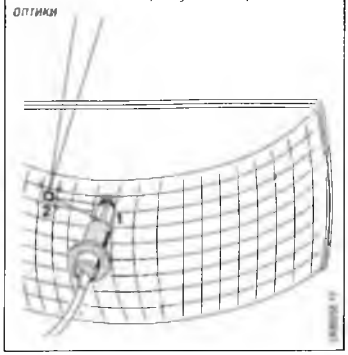


Рис. 9. Отражатель произвольной формы или типа HNS
Отражение рисунка нити накаливания с участием зеркальной оптики:
1 – нить накаливания, 2 – участок зеркальной оптики

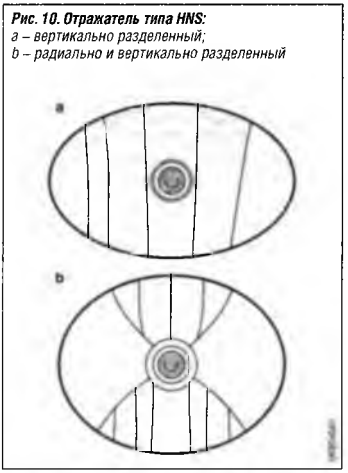


Рис. 10. Отражатель типа HNS:
a – вертикально разделенный;
b – радиально и вертикально разделенный



Рис. 11. PES-отражатель (оптический принцип):
1 – линза; 2 – экран; 3 – отражатель, 4 – лампа

руется индивидуально. Важной особенностью поверхности отражателя типа HNS является допущение неразрывности и ступенчатости на всех пограничных поверхностях. Это обеспечивает возможность создания поверхностей отражателей различной формы с максимальной однородностью освещения (рис. 9 и 10).

Фары PES

В системе фар PES (полиэлипсоидная система) используется фотодетекторная оптика (рис. 11), и по сравнению с традиционными фарами она обеспечивает больше возможностей в плане дизайна. Область открывания рассеивателя диаметром всего 40–70 мм позволяет создавать световые рисунки, которые раньше можно было реализовать только с помощью фар с большой площадью. Такой результат получается посредством использования эллиптического отражателя (проектируемого по программе CAL) в сочетании с методами технологии оптической проекции. С помощью экрана можно создать нужную светотеневую границу. В зависимости от отдельных специфических требований эта граница может быть резкая или размытая, что определяется геометрией экрана.

Фары PES можно комбинировать с традиционными фарами дальнего света, габаритным светом и противотуманными фарами PES, образуя блоки, в которых вся фара оказывается не выше приблизительно 80 мм.

В фарах PES исходящие лучи света могут быть направлены таким образом, чтобы зона, окружающая линзу, также использовалась для получения светового сигнала. Такой – расширенный – пучок света применяется, главным образом, совместно с линзами небольших диаметров для снижения ослепления водителей встречных автомобилей. Дополнительную поверхность можно также превратить в рассеиватель, экран в виде пленки, осажденной из паровой фазы, или особенность дизайна с подсвечиваемыми круглыми или прямоугольными зазорами, или подсвечиваемые трехмерные объекты.

Ксеноновые фары

Система фар с ксеноновыми газоразрядными лампами как центральным компонентом (рис. 12) создает высокий уровень интенсивности освещения с минимальными требованиями к фронтальной поверхности, что делает их идеальными для автомобилей с аэродинамическим дизайном. В отличие от традиционной лампы накаливания, свет создается за счет плазменного разряда внутри горелки размером с вишневую косточку (рис. 13).

Дуга газоразрядной лампы в 35 Вт создает световой поток, который по интенсивности вдвое превосходит световой поток галогенной лампы H1 и имеет более высокую цветовую температуру (4200 K), что означает более высокую долю зеленого и синего цветов в спектре, как у солнечного света. Максимальная световая отдача, соответствующая приблизительно 90 лм/Вт, становится доступной, как только кварцевый элемент достигает нормальной рабочей температуры более 900°C. Для получения «мгновенного света» можно использовать короткие пики высоко-

мощного режима работы при токах до 2,6 А (непрерывный режим работы – около 0,4 А). Ресурс в 2000 часов достаточен для среднего срока эксплуатации в легковых автомобилях. Поскольку внезапных отказов, как в случае с лампами накаливания, не происходит, то возможны диагностика и своевременная замена.

До последнего времени использовались газоразрядные лампы с обозначениями D1 и D2, а с 2012 используются только лампы с обозначениями D3 и D4. В семействах D3 и D4 может содержаться ртуть (около 1 мг). Эти лампы отличаются более низким напряжением, составом плазмы и геометрией дуги. Электронные блоки управления отдельными типами ламп обычно разрабатываются для конкретной конструкции и не являются универсальными.

Автомобильные газоразрядные лампы серий D2 и D4 имеют высоковольтные цоколи и стеклянные экраны для защиты от ультрафиолетовых лучей. У серий D1 и D3 необходимая для работы высоковольтная электроника также встроена в цоколь лампы. Все системы делятся на две подкатегории: S-лампы для фар проекционного типа и R-лампы для фар отражательного типа со встроенным световым экраном для создания светотеневой границы, сравнимым с крышкой у галогенной лампы H4 ближнего света. В настоящее время лампы D1S и D3S являются наиболее распространенными.

Неотъемлемой частью фары Litronic (от англ. Light – свет и Electronic – электронный) является электронный балластный модуль, отвечающий за активацию и контроль работы лампы (рис. 14). К этим функциям относятся воспламенение газового разряда (напряжение 10–20 кВ), управляемая подача питания во время фазы разогрева, когда лампа холодная, и питание в зависимости от потребности во время стационарной работы.

Система обеспечивает очень хорошо согласующиеся уровни освещения (нет изменений светового потока) путем компенсирования колебаний напряжения бортовой сети. Как только лампа отключается (например, в результате временного отклонения напряже-

Рис. 13. Газоразрядная лампа D2S/DS4:
1 – колба ультрафиолетовой лампы;
2 – проходной изолятор;
3 – разрядная камера (горелка);
4 – электроды;
5 – цоколь

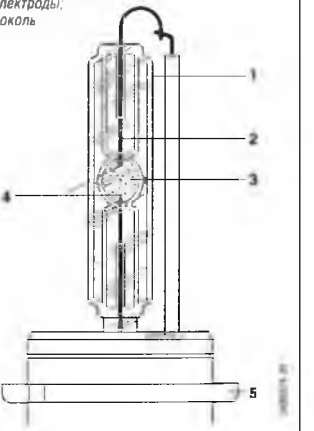


Рис. 12. Компоненты PES-фары Litronic:
1 – ЭБУ;
2 – к бортовой сети;
3 – экранированный кабель,
4 – блок зажигания фары D1S/D3S;
5 – проекционный модуль,
5a – горелка фары D1S/D3S;
5b – рассеиватель

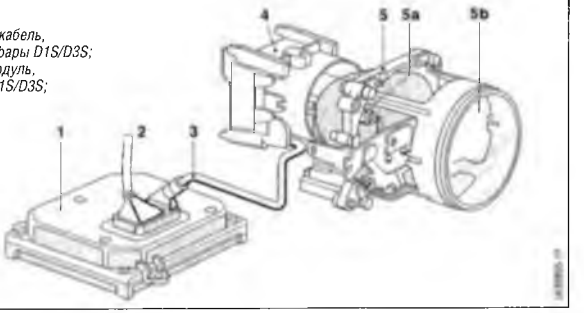
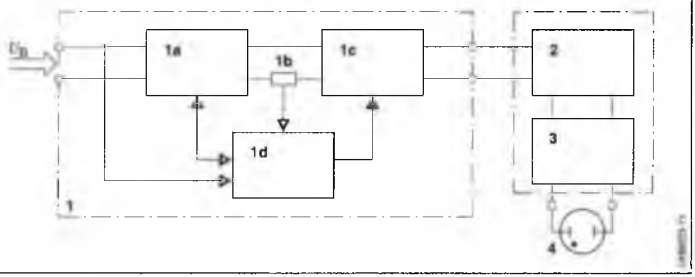
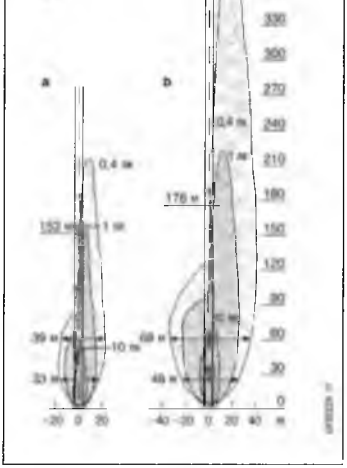


Рис. 14 Электронный балластный модуль для выработки переменного тока частотой 400 Гц и импульсного зажигания лампы:
1 – ЭБУ; 1a – преобразователь DC/DC; 1b – шунт; 1c – преобразователь DC/AC; 1d – Микропроцессор; 2 – блок зажигания; 3 – патрон; 4 – лампа D2S; U_B – напряжение аккумуляторной батареи



ния питания в бортовой сети), происходит ее автоматическое вторичное зажигание.
Электронный балластный модуль реагирует на неисправности (повреждение лампы), прерывая подачу питания и позволяя, таким образом, избежать ранений в случае столкновения.

Рис. 15. Схема распределения света на дороге (сравнение):
a – галогенная лампа H4;
b – лампа Litronic PES D2S



Ксеноновый свет, излучаемый фарами Litronic, дает широкий световой пучок перед автомобилем в сочетании с большой дальностью освещения (рис. 15). Это позволило существенно шире освещать дорогу и освещать края поворотов и широкие дороги столь же эффективно, как галогенная фара освещает прямые участки дороги. Для водителя улучшаются дальность видимости и ориентация при сложных условиях управления автомобилем и неблагоприятных климатических явлениях.

В соответствии с Правилами ЕЭК 48 [12] фары Litronic комбинируются с системами автокоррекции наклона фар и системами стеклоомывателей фар. Эта комбинация обеспечивает всегда оптимальное использование большой дальности освещения и визуально не ухудшающееся световое излучение.

Bi-Litronic
Системы Bi-Litronic при двухфарной схеме обеспечивают получение дальнего и ближнего света с использованием только одной газоразрядной лампы.

Bi-Litronic «Projection» (биксенон):
Система Bi-Litronic «Projection» базируется на использовании фары PES Litronic (рис. 16). При включении дальнего света световой экран, создающий светотеневую границу (для ближнего света) выдвигается из светового луча. Данная система, использующая линзы диаметром 70 мм, в настоящее время является наиболее компактной, обеспечивающей

получение комбинированного дальнего/ближнего света и в то же время характеризующейся высокой яркостью света (рис. 18).

Главным преимуществом системы Bi-Litronic «Projection» является использование ксенона для дальнего света.

Система Bi-Litronic «Reflection»:
И в моно-, и в биксеноновых системах используется одна лампа DxR как для ближнего, так и для дальнего света.

В биксеноновой версии при включении дальнего/ближнего света электромеханическое исполнительное устройство перемещает газоразрядную лампу в соответствующее положение относительно отражателя для получения конусообразного пучка дальнего/ближнего света (рис. 17).

Поворачивающиеся фары
Поворачивающиеся фары были допущены для эксплуатации в автомобилях в начале 2003 года. Если раньше разрешался адаптивный поворот лишь фар дальнего света (Citroen DS образца 60-х), то теперь он разрешен и для ближнего света (так называемые адаптивные фары) или дополнительного источника света (статичные фары для освещения поворотов). Это увеличивает видимость на извилистых дорогах.

Статичные фары для освещения поворотов
Статичные фары для освещения поворотов используются в основном для освещения зон по бокам автомобиля (на перекрестках, на поворотах). Для этой цели обычно самым эффективным способом является активация дополнительных отражательных элементов.

Рис. 16. Система Bi-Litronic "Projection"
1 – ближний свет; 2 – дальний свет

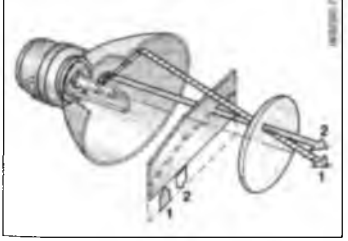


Рис. 17. Система Bi-Litronic "Reflection":
1 – ближний свет; 2 – дальний свет

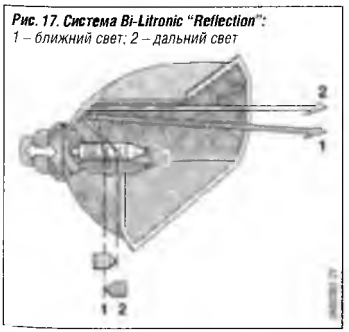
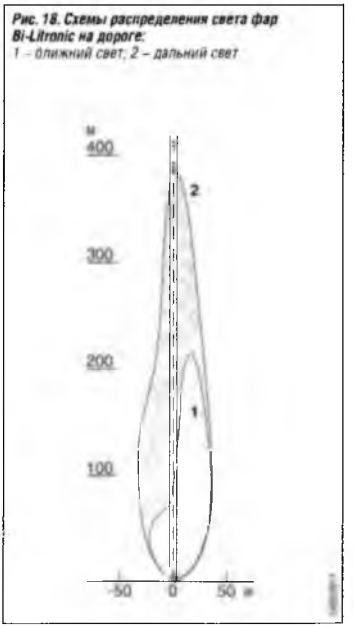


Рис. 18. Схемы распределения света фар Bi-Litronic на дороге:
1 – ближний свет; 2 – дальний свет



Динамические поворотные фары

Динамические поворотные фары используются для освещения изменяющейся траектории дороги, например, на извилистых шоссе (рис. 19).

В отличие от поворотных фар 60-х годов с непосредственным действием, современные высокотехнологичные системы электронно управляют скоростью и углом поворота фар соответственно скорости автомобиля. Это оптимизирует «согласование» между фарами и поведением автомобиля, отсутствует «дерганье» фар. Позиционирование фар выполняется шаговыми двигателями, перемещающими базовый модуль или модуль ближнего света, или отражательные элементы в ответ на изменение угла поворота рулевого колеса или угла поворота передних колес (рис. 20). Датчики обнаруживают эти изменения во избежание ослепления встречного транспорта посредством отказоустойчивых алгоритмов. Общие требования законодательства определяют, что во избежание ослепления встречного транспорта луч фары может поворачиваться лишь до центральной линии дороги на расстоянии около 70 м перед автомобилем.

Безопасность движения и комфорт вождения

Появление динамических поворотных фар – значительный прорыв в области безопасности движения и комфорта вождения ночью (рис. 21). По сравнению с традиционными фарами ближнего света достигается улучшение видимости около 70%, что в пересчете на время движения составляет около 1,6 секунды. С поворотными фарами водитель может быстрей оценить опасность и раньше начать тормозить. В результате можно значительно снизить тяжесть ДТП. Статичные фары для освещения поворотов удваивают видимость в поворотах.

Рис. 20. Модули поворотных фар:
1 – опорная рама; 2 – монтажная рама; 3 – привод для вращения по горизонтали; 4 – Bi-Litronic PES

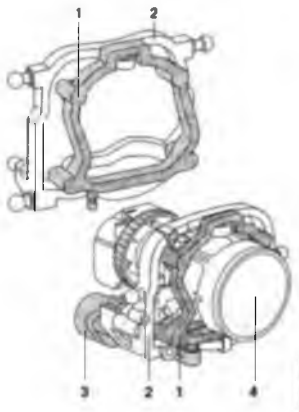
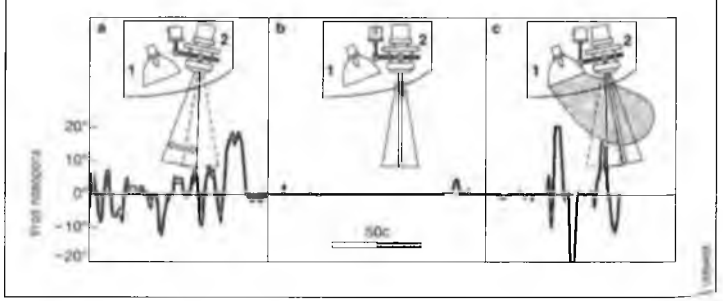


Рис. 19. Стратегия включения и регулировки поворотных и базовых модулей статичной/динамической поворотной фары (левая сторона):
a – положение «шоссе/повороты», b – положение «автомагистраль», c – положение «город/повороты»; 1 – поворотный модуль, 2 – базовый модуль



Функции AFS

Свет для скоростных магистралей

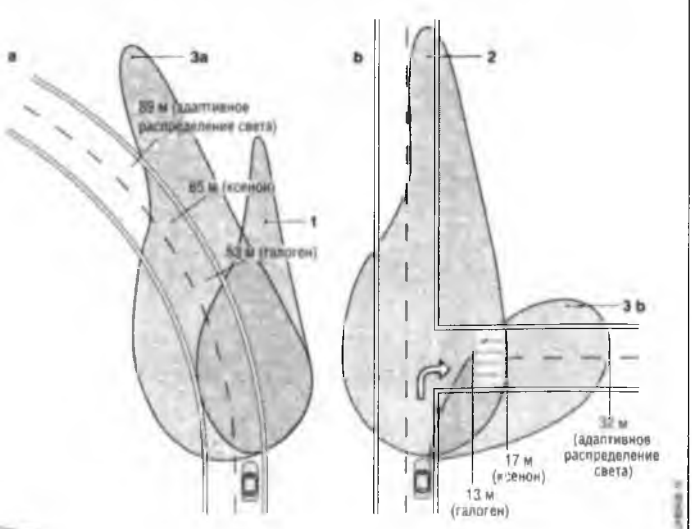
Для особых ситуаций вождения разработана система адаптивного переднего освещения (AFS), обеспечивающая водителю лучшую видимость в каждой ситуации. При разработке системы освещения для скоростных магистралей (рис. 22), особое внимание уделялось улучшению видимости без излишнего ослепления встречного транспорта. Увеличение видимости до 150 м позволяет увеличить время движения до обнаруженного объекта примерно на 2 секунды (сравнение при скорости 100 км/ч с галогенными лампами). Это позволяет водителю лучше оценить критическую ситуацию и намного раньше начать торможение.

Освещение при плохой погоде

В случае освещения при плохой погоде особое внимание уделяется улучшению визуального ориентирования на дороге. Освещение становится лучше, особенно освещение зон по бокам дороги.

Большинство вариантов освещения при плохой погоде предусматривают поворот левой фары на 8° вбок и одновременно небольшое опускание или активацию статичных фар для освещения поворотов. Это обеспечивает очень широкое освещение дороги и краев дороги. В будущем отдельные компоненты, например, ответственные за расширение освещения по бокам, будут активироваться последовательно. Управляющими параметрами являются, к примеру, угол поворота и направление. Отдельные сегменты активируются в этом случае «квазидинамически».

Рис. 21. Измеримое улучшение видимости с адаптивным распределением света поворотных фар:
a – левый поворот, динамические поворотные фары, b – правый поворот, статичные поворотные фары, 1 – галогенные фары, 2 – ксеноновые фары; 3a – адаптивное распределение света у динамичвских поворотных фар, 3b – адаптивное распределение света у статичных поворотных фар



Функции фар и системы повышения безопасности при движении (DAS)

Появление видеотехнологий в автомобилестроении позволило усовершенствовать функции фар с помощью видеокамеры. Когда видеокамера определяет положение встречного автомобиля, фара или система AFS может адаптировать дальность света таким образом, чтобы она повышалась для больших расстояний и уменьшалась для маленьких (функция динамического изменения дальности). Это обеспечивает оптимальное освещение без ослепления встречного транспорта.

Светодиодные фары

Потенциал для снижения энергопотребления

Светодиоды (LED) все чаще используются в качестве экономичной альтернативы в борьбе за снижение выбросов CO_2 и расхода топлива. Энергопотребление основных функций освещения будет играть значительную роль в экономичных автомобилях будущего. Ксенон и светодиоды обеспечивают снижение потребления энергии и повышение безопасности движения, требуемых в ЕС.

Современные светодиодные системы, в зависимости от характеристик (световой поток, дальность, боковое освещение), уже сейчас потребляют гораздо меньше энергии, чем галогенные лампы. В настоящее время потребляемая мощность колеблется в пределах 28–50 Вт на фару. В сравнении с выходной мощностью ламп порядка 65 Вт (для напряжения 13,2 В), это означает потенциальную экономию в 30–70 Вт на автомобиль.

Рис. 23. Базовая конструкция светодиодной фары ближнего света

Взаимодействие проекционной и отражательной систем:
a – проекционная система для образования пятна;
b – отражательная система для базового света;
c – общее распределение света,
1 – светодиоды;
2 – световой экран для светотеневой границы;
3 – проекционная система, 4 – отражатель;
5 – пятно; 6 – базовый свет

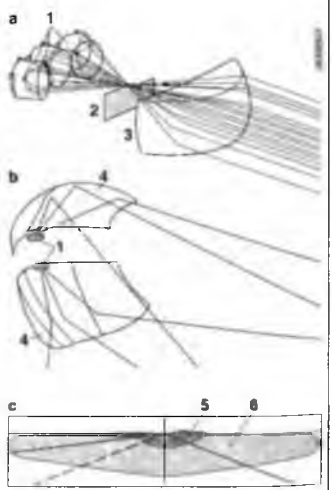
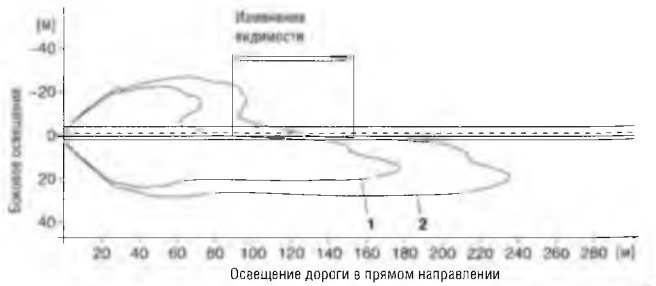


Рис. 22. Функциональная связь между светом на шоссе и светом на автомагистрали:

1 – освещение дороги светом для шоссе; 2 – освещение дороги светом для автомагистрали



Для ближнего света используется одна проекционная система и два отражательных элемента. Свет трех многокристальных светодиодов по два светодиода в каждом концентрируется тремя первичными оптическими элементами и отображается проекционным рассеивателем. Оптическая система имеет экран, гарантирующий качество светотеневой границы. Над рассеивателем и под ним располагается отражатель (рис. 23).

Оптическая эффективность светодиодной фары ближнего света составляет около 45%. Для сравнения – эффективность биксеноновой системы составляет около 33%. Это объясняется природой светодиодов, испускающих свет только в половину пространства, и, в отличие от традиционных источников света, не освещающих все пространство. В силу более высокой эффективности светодиодной системы, одной светодиодной фаре ближнего света требуется меньший световой поток для освещения дороги.

Чем лучше будут становиться светодиоды в будущем, тем меньше мощности будет выдавать блок управления при неизменно высокой эффективности освещения.

Первые светодиодные фары на рынке также показывают возрастание роли элементов дизайна. К примеру, в 2008 году светодиодная фара впервые получила всемирно известную награду за дизайн.

Около 75% всего пробега автомобилей приходится на дневные часы. Поэтому большое значение придается также потреблению энергии фарами в дневное время. Типичная светодиодная фара в качестве дневных ходовыз огней потребляет 14 Вт (0,36 г CO_2/км). На использование обычных фар днем затрачивается до 300 Вт (7,86 г CO_2/км) (фары ближнего света, задние фонари, габаритные огни, лампы подсветки номерного знака, подсветка кнопок и приборов).

Противотуманные фары

Противотуманные фары (белый свет) предназначены для улучшения освещения проезжей части дороги во время тумана, снегопада, сильного дождя и большой запыленности воздуха. Для этой цели создается световой луч с особенно большим боковым рассеиванием. Он обеспечивает особенно хорошее освещение той стороны дороги, которая находится ближе к автомобилю. Достигаемый уровень яркости близких объектов значительно выше. В отличие от обычно темной поверхности дороги далеко впереди автомобиля, этот высокий уровень яркости помогает водителям лучше сориентироваться, несмотря на плохие погодные условия.

Конструкция

Противотуманные фары представляют собой отдельные световые приборы в собственном корпусе. Такие фары устанавливаются на бампере или подвешиваются под ним (рис. 24). Стилистические и аэродинамические аспекты привели к распространению встроенных противотуманных фар, предназначенных либо для установки в отверстия в кузове, либо входящих в состав более крупного узла освещения (с регулируемыми отражателями при комбинировании противотуманных фар с основными).

Современные противотуманные фары дают белый свет. Пока не имеется существенных доказательств того, что лампы желтого цвета обеспечивают какое-либо преимущество с точки зрения физиологии восприятия. Эффективность противотуманной фары зависит от размера зоны освещения и фокусного расстояния отражателя. При тех же зонах освещения и фокусном расстоянии, с точки зрения техники освещения, разности в показателях круглых и прямоугольных противотуманных фар нет.

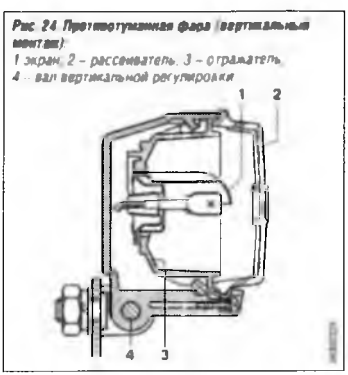


Рис. 24. Противотуманная фара (вертикальный монтаж):
1 – экран; 2 – рассеиватель; 3 – отражатель; 4 – вал вертикальной регулировки

Нормы и правила

Конструкция противотуманных фар регламентируется правилами ECE R19 [8], монтаж – ECE R48 [12] (и StVZO (Правила регистрации транспортных средств) ст. 52 [3] в Германии). Допускается наличие двух противотуманных фар белого или желтого света. Цепь управления для включения противотуманных фар должна быть независимой от цепи, используемой для дальнего и ближнего света фар. В Германии Правила регистрации транспортных средств разрешают установку противотуманных фар в местах, расположенных более чем в 400 мм от крайней точки по ширине автомобиля, при этом они должны быть подключены таким образом, чтобы их можно было включать только при включенном ближнем свете (рис. 25).

Параболоид с рассеивателем

Отличительной чертой параболического отражателя является источник света, расположенный в фокальной точке, благодаря чему отражатель направляет свет вдоль центральной оси (как и у фар дальнего света) (рис. 24). Рассеиватель расширяет этот пучок света, формируя горизонтальную полосу, в то время как специальный экран предотвращает проецирование луча по направлению вверх.

Технология создания отражателя произвольной формы

Для проектирования форм отражателей можно использовать такие методы вычислений, как CAL (компьютерное управление освещением) таким образом, чтобы отражатели рассеивали свет непосредственно (т.е. без оптического оконтуривания) и создавали резкую светотеневую границу (без отдельного затенения). Поскольку отражатель противотуманной фары конструктивно охватывает лампу, можно получать чрезвычайно высокий световой поток вместе с максимальной шириной рассеивания света (рис. 26).

Противотуманные фары PES

Эта технология сводит к минимуму отраженные блики в тумане. Экран, изображение которого проецируется на дорожное покрытие посредством линзы, обеспечивает светотеневую границу с минимальным рассеиванием света вверх.

Инновации

Технико-функциональная важность противотуманных фар немного отошла на задний план с появлением мощных галогенных, ксеноновых ламп и систем AFS. Акцент все еще делается на улучшение освещения в ситуациях с неблагоприятными погодными условиями. Эту проблему можно решить с помощью раздельных противотуманных фар, используемых ныне (согласно ECE R19 [8]), систем AFS для плохой погоды (согласно ECE R123 [23]) или сочетания этих двух функций.

Рис. 25. Противотуманная фара (расположение)

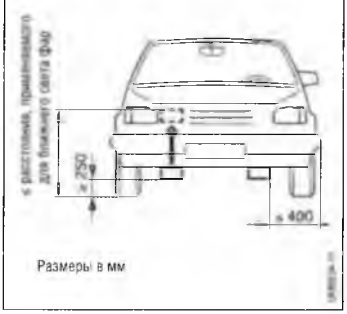
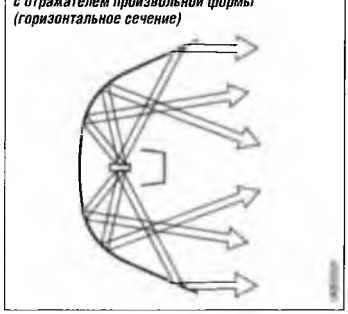


Рис. 26. Противотуманная фара с отражателем произвольной формы (горизонтальное сечение)



Установка светосигнальных ламп, правила их использования

Светосигнальные лампы призваны облегчить распознавание автомобиля и предупредить других участников дорожного движения. Для светосигнальных ламп предписываются единые, строго определенные цвета – красный, желтый или белый. Белый, желтый и красный цвета используются для обозначения положений автомобиля соответственно спереди, по бокам и сзади. Стоп-сигналы и задние противотуманные фонари также красные. Желтые лампы используются в большинстве случаев для указателей поворотов. Лишь в США задние указатели поворотов могут быть красными.

По продольной оси сила света (минимальная и максимальная) для всех фонарей должна оставаться в пределах заданного диапазона в целях гарантированного распознавания автосигнала, однако без какого-либо раздражающего ослепления для других участников дорожного движения.

Указатели поворотов и система аварийной сигнализации

(согласно ECE R6 [6])

Правила ECE R48 и 76/756/EEC определяют группу 1 (передние), группу 2 (задние) и группу 5 (боковые) указателей поворотов у автомобилей с тремя и более колесами. Фонари указателей поворота группы 2 являются достаточными для установки на мотоциклы и мопеды.

Контроль за работой указателей поворотов осуществляется электрическим способом. Требуется установка индикатора внутри автомобиля. Лампа индикатора указателя поворота приборного щитка может быть любого цвета.

Частота мигания равна 90 ± 30 циклам в минуту с периодом относительного освещения 30–80%. После включения сигнала излучение света должно происходить не позже чем через 1,5 с. Все лампы указателей поворота с одной стороны автомобиля должны мигать синхронно. При выходе из строя одной лампы остальные лампы должны продолжать работать.

В режиме аварийной сигнализации все лампы указателей поворота должны мигать синхронно; они должны работать и при остановке автомобиля. Обязательно использование светового индикатора работы системы.

Передних, боковых и задних ламп указателей поворота должно быть по две (цвет: желтый). В США для задних и боковых указателей поворота разрешается установка ламп красного или желтого цвета (SAE J588, ноябрь 1984, [33]).

Рис. 27. Позиционирование передних указателей поворотов по нормам ЕЭК

Размеры приведены в миллиметрах.
[1] Менее 2100 мм, если данный тип кузова не позволяет соответствовать требованиям к максимальной высоте

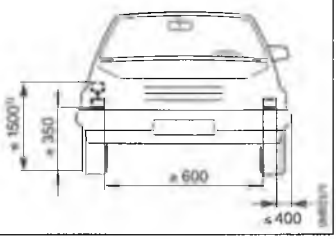


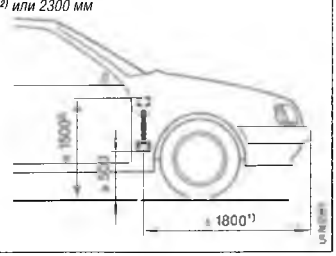
Рис. 28. Расположение задних указателей поворотов по нормам ЕЭК

Размеры приведены в миллиметрах.
1 – Задний фонарь. Высота и ширина те же, что и для передних указателей поворотов



Рис. 29. Расположение боковых указателей поворотов по нормам ЕЭК

Размеры приведены в миллиметрах.
Если данный тип кузова не позволяет соответствовать требованиям к максимальным размерам
[1] или 2500 мм,
[2] или 2300 мм



Требования к конструкции
Требования к конструкции в Европе изложены в Правилах ECE R6, R7, R23, R38 и R87 [6, 7, 9, 11, 16], а требования к установке – в Правилах ECE R48 [12] (рис. 27, 28 и 29).

В США количество, расположение и цвет сигнальных ламп регламентируются предписанием FMVSS 108. Требования к конструкции и параметрам освещения определены в соответствующих стандартах SAE.

Аварийная сигнализация и указатели поворотов у автомобилей без прицепа
Электронная система мигающей аварийной сигнализации и указателей поворотов содержит импульсный генератор для включения ламп через реле и контрольную схему для изменения частоты мигания в случае выхода из строя любой лампы. С помощью рычажного переключателя осуществляется управление работой указателей поворотов, в то время как включение системы аварийной сигнализации производится отдельным выключателем.

Аварийная сигнализация и указатели поворотов у автомобилей с прицепом
Этот тип аварийной сигнализации и указателей поворотов отличается от используемого в автомобилях без прицепа способом управления работой указателей поворотов во время мигания для указания смены направления.

Односхемный блок контроля:
Тягач и прицеп оборудуются общим односхемным блоком контроля, служащим для включения двух индикаторных ламп с определенной частотой мигания. Этот тип контрольного блока не может применяться для локализации выхода из строя любого фонаря. Частота мигания фонарей при этом остается постоянной.

Двухсхемный блок контроля:
Тягач и прицеп оборудуются раздельными блоками контроля. Неисправность сигнализируется индикаторной лампой. Частота мигания фонарей при этом остается постоянной.

Задние и габаритные фонари
(согласно ECE R7 [7])
Согласно ECE R48 и 76/756/EEC, на автомобилях с прицепом шириной более 1600 мм должны быть установлены габаритные фонари, обращенные вперед, а задние являются обязательным оборудованием для автомобилей любой ширины. Автомобили шириной более 2100 мм (например, грузовые автомобили) также должны оснащаться передними и задними габаритными фонарями.

Габаритные фонари
В технических нормах оговорена установка двух фонарей белого света. В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J222, декабрь 1970, [29].

Задние фонари
Обязательным техническим оборудованием являются два задних фонаря красного цвета. Когда используется совмещенная конструкция с сигналом торможения и задним габаритным фонарем, то отношение силы света для выполнения отдельных функций должно быть по крайней мере 5:1. Задние фонари должны работать вместе с габаритными.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J585e, сентябрь 77, [30].

Габаритные фонари
(согласно ECE R7 [7])
У автомобилей шириной более 2100 мм должно быть два белых габаритных фонаря, обращенных вперед и два красных габаритных фонаря, обращенных назад. Они должны располагаться как можно дальше наружу и как можно выше.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J592e, [34].

Боковые габаритные фонари
(согласно ECE R91 [7])
Согласно ECE R48, автомобили длиной более 6 м должны иметь желтые боковые габаритные фонари (SML), кроме автомобилей без кузова (только с шасси и кабиной).

Боковые габаритные фонари SM1 могут использоваться на автомобилях всех категорий. Боковые габаритные огни SM2 могут использоваться только на легковых автомобилях.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J592e.

Задние отражатели
(согласно ECE R3 [4])
Согласно ECE R48, на автомобилях должно быть два красных нетреугольных задних отражателя (один на мопедах и мотоциклах).

Разрешаются дополнительные отражательные элементы (красная отражающая лента), если они не ухудшают работу стандартно требуемого осветительно-сигнального оборудования.

На прицепах и на автомобилях, где все обращенные вперед лампы с отражателями скрыты (т.е. убираются), должно быть установлено два бесцветных нетреугольных передних отражателя. Они разрешены и на всех других типах автомобилей.

На всех автомобилях длиной более 6 м и на всех прицепах должны быть желтые нетреугольные боковые отражатели. Они могут устанавливаться и на автомобилях длиной менее 6 м.

На всех прицепах должно быть два красных треугольных задних отражателя. Нанесение их на автомобили запрещено.

Внутри треугольников не должно быть ламп.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J594f, [36].

Стояночные фонари

(согласно ECE R77 [15])

Согласно ECE R48, транспортное средство может оснащаться или двумя стояночными фонарями спереди и двумя сзади, или одним стояночным фонарем с каждой стороны. Предписанные цвета – белый для обращенных вперед, красный для обращенных назад. Желтый цвет может быть использован для заднего стояночного фонаря, если он используется как единый прибор совместно с указателем поворота.

Стояночные фонари предназначены для функционирования даже тогда, когда другие автомобильные приборы освещения не включены. Функции стояночных фонарей обычно принимает на себя задний и передний габаритные фонари.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J222, декабрь 1970.

Лампы освещения номерного знака

(согласно ECE R5 [5])

Согласно ECE R48, задний номерной знак должен быть освещен так, чтобы быть читаемым ночью на расстоянии 25 м.

По всей поверхности номерного знака яркость должна составлять не менее 2,5 кд/м^2. Не должен превышаться разброс яркости $2 \times B_{min}$/см между любыми контрольными точками на поверхности номерного знака. B_{min} определяется как минимальная яркость, измеренная в контрольной точке.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J587, октябрь 1981, [32].

Как альтернатива лампе подсветки номерного знака в будущем могут быть разрешены самосветящиеся номерные знаки.

Стоп-сигналы

(согласно ECE R7 [7])

Согласно ECE R48, все автомобили должны быть оснащены двумя стоп-сигналами типа S1 или S2 и одним стоп-сигналом типа S3, во всех случаях красного цвета (рис. 30).

Когда используется совмещенная конструкция с сигналом торможения и задним габаритным фонарем, то отношение силы света для выполнения отдельных функций должно быть по крайней мере 5 : 1.

Стоп-сигнал категории S3 (высокорасположенный центральный стоп-сигнал) не должен комбинировать в одном блоке с другими лампами.

В США действуют правила, изложенные в стандартах SAE J586, февраль 1984, [31] и SAE J186a, сентябрь 1977, [28].

Рис. 30. Расположение стоп-сигналов по нормам ЕЭК

Размеры приведены в миллиметрах:

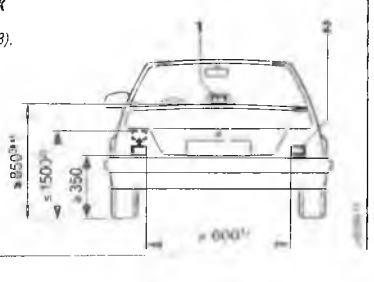
1 – центральный верхний стоп-сигнал (категория S3),

2 – два стоп-сигнала (категории S1 и S2)

[1] > 400 мм, если ширина < 1300 мм;

[2] ≤ 2100 мм, если выполнение требований к максимальной высоте невозможно или ≤ 150 мм ниже нижнего края заднего окна,

[4] однако нижний край центрального верхнего стоп-сигнала должен быть выше верхнего края основных стоп-сигналов



Задние противотуманные фонари
(согласно ECE R38 [11])
Для стран ЕС/ЕЭК Правила ECE R48 предписывают один или два красных задних противотуманных фонаря у всех новых автомобилей. Расстояние между задним противотуманным фонарем и стоп-сигналом должно быть не менее 100 мм (рис. 31).

Видимая освещенная зона вдоль эталонной оси не должна превышать 140 см². Электрическое питание должно обеспечивать работу противотуманного фонаря вместе с фарами ближнего, дальнего света и передними противотуманными фарами. Также возможно в конструкции предусматривать независимое отключение противотуманного фонаря от передних противотуманных фар.

Задние противотуманные фонари можно использовать только при снижении видимости из-за тумана до <50 м, так как они дают большую силу света, и в нормальную погоду могут серьезно ослепить движущихся сзади водителей. Индикаторная лампа должна быть желтой.

Фонарь заднего хода
(согласно ECE R23 [9])
Согласно ECE R48, разрешается использовать один или два белых фонаря заднего хода (рис. 32). Цепь питания должна быть разработана с таким расчетом, чтобы обеспечивать работу фонаря только с включенными передачей заднего хода и зажиганием.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J593c, февраль 1968, [35].

Дневные ходовые огни
(согласно ECE R87 [16])
Правила ECE R87 регламентируют установку дневных ходовых огней на автомобилях в Европе (рис. 33). Их использование или использование фар ближнего света для движения в дневное время предписано в отдельных странах (по состоянию на 2009 год это: Дания, Норвегия, Финляндия, Швеция, Латвия, Эстония, Литва, Австрия, Венгрия, Польша, Словакия, Словения, Чехия, Испания (вне населенных пунктов) и Италия (вне населенных пунктов)).

По состоянию на февраль 2011 года наличие дневных ходовых огней согласно ECE R87, необходимо для легковых автомобилей, а ориентировочно с 2012 года их наличие будет необходимо и для автомобилей других классов (рис. 34). Это постановление заменит собой национальные предписания.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J2087, март 2006, [38].

Рис. 32. Расположение фонарей заднего хода по нормам ЕЭК
Размеры приведены в миллиметрах.
Количество 1 или 2

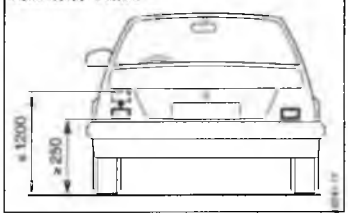
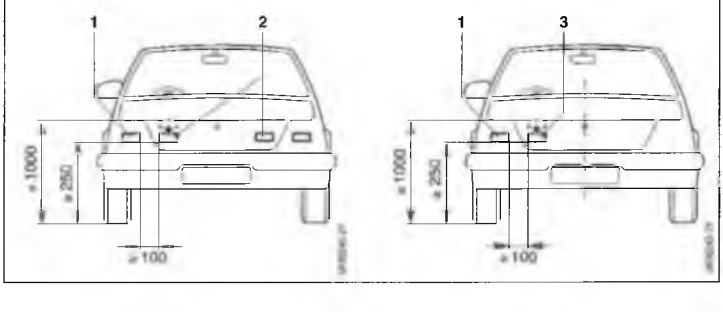


Рис. 31. Расположение задних противотуманных фонарей по нормам ЕЭК
Размеры приведены в миллиметрах
1 – стоп-сигнал; 2 – два задних противотуманных фонаря; 3 – один задний противотуманный фонарь для движения справа



Передние поворотные фары
(согласно ECE R119 [22])
В передней части автомобиля разрешается устанавливать две поворотных фары, излучающие свет на угол не менее 60°. Они используются при поворотах со скоростью не более 40 км/ч для более оптимального освещения дорог (примыкающих дорог или въездов в гаражи), которые обычно недостаточно освещаются стандартными фарами. Передние поворотные фары включаются с помощью рычажка управления указателями поворотов или при повороте рулевого колеса.

Передние поворотные фары обычно дают такое же распределение света, как и статичные поворотные фары. Однако условия включения различаются. И для передних поворотных фар, и для статичных поворотных фар используется по большей части один и тот же отражатель.

В США действуют правила, изложенные в стандарте SAE J852, апрель 2001, [37].

Опознавательные огни
Согласно ECE R65 [14], опознавательные огни должны быть видны из любого направления и создавать впечатление мигания. Частота мигания составляет 2–5 Гц. Опознавательные огни синего цвета предназначены для установки на автомобили специального назначения. Огни желтого цвета устанавливаются для предупреждения об опасности.

Варианты конструкций фонарей

Цвет фонаря
В зависимости от сферы применения (например, фонари стоп-сигнала, указателей поворотов, предупреждения о тумане), автомобильные приборы освещения должны излучать свет постоянной цветовой характеристики в красном или желтом цветовом диапазоне стандартной цветовой шкалы. Эти цвета определяются конкретными диапазонами стандартизированной цветовой шкалы (положение цвета).

Так как белый цвет образуется смешиванием различных цветов, цветные светофильтры могут применяться для ослабления или полного отфильтровывания светоизлучения в нежелательных диапазонах цветового спектра. Роль цветного светофильтра могут выполнять либо подкрашенные отражатели приборов освещения, либо цветовые покрытия, наносимые на стеклянные плафоны этих приборов.

Для проектирования рассеивателей фар можно также использовать технологию фильтрации, чтобы при выключении фары цвет совпадал с цветом автомобиля. Тем не менее, существующие правила выполняются, когда лампа включена. Расположение цветов изложено в нормативной документации ЕС/ЕЭК. Они соответствуют длине волны около 592 нм для «желто-оранжевых» указателей поворота, и примерно 625 нм для «красных» стоп-сигналов и задних фонарей.

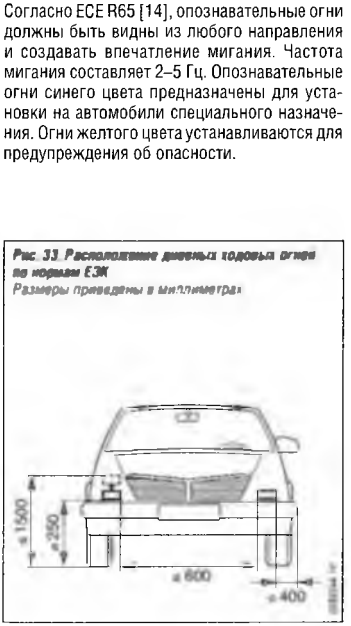


Рис. 33. Расположение дневных ходовых огней по нормам ЕЭК
Размеры приведены в миллиметрах

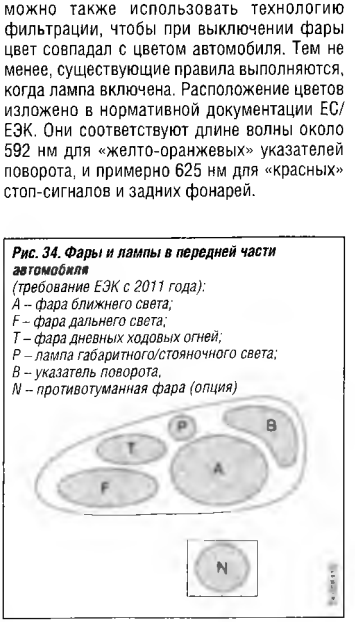
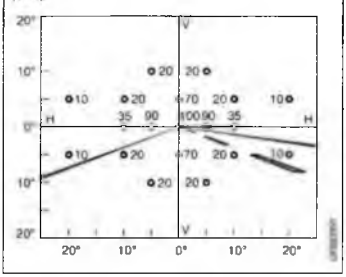


Рис. 34. Фары и лампы в передней части автомобиля
(требование ЕЭК с 2011 года):
A – фара ближнего света;
F – фара дальнего света;
T – фара дневных ходовых огней;
P – лампа габаритного/стояночного света;
B – указатель поворота,
N – противотуманная фара (опция)

Сила света

По разным осям сила света (минимальная и максимальная) для всех фонарей должна оставаться в пределах заданного диапазона в целях гарантированного распознавания автосигнала, однако без какого-либо раздражающего ослепления для других участников дорожного движения. Та же базовая пропорция («унифицированный рисунок пространственного распределения света») используется для большинства ламп. Уровни силы света по бокам, выше и ниже главной оси могут быть меньшими, чем вдоль самой оси (рис. 35). Однако эти значения могут отличаться от базового в зависимости от монтажной высоты или у особых фар (например, фар для дневных ходовых огней).

Рис. 35. Измерительный экран для проверки фонарей по ЕЭК
Схема пространственного распределения света (в %)



Фонари на основе линз Френеля

Свет от лампы проецируется прямо на рассеиватель, использующий линзы Френеля для формирования луча нужным образом (рис. 36). Эта концепция является очень экономически выгодным решением – не требуется поверхность, получаемая при осаждении паровой фазы. Недостатками являются низкая эффективность и ограниченные возможности в плане дизайна автомобиля.

Фонари на основе рефлекторной оптики

Лампы с приблизительно параболическими отражателями или ступенчатыми отражателями направляют свет от лампы в виде осевого луча и формируют луч с помощью оптических элементов в рассеивателе (рис. 37).

В фонарях с отражателями произвольной формы нужный спектр луча и световой рисунок, полностью или частично, получаются путем направления света с помощью отражателя. Поэтому внешний рассеиватель может быть выполнен в виде прозрачной линзы, либо дополнен цилиндрическими линзами в горизонтальном или вертикальном направлении.

Также успешно применяются конструкции, сочетающие оба эти принципа. Принцип фонаря произвольной формы с линзой Френеля сочетает отличную световую отдачу с целым рядом возможных вариантов дизайна. В основном световой пучок формируется отражателем. Затем с помощью оптической линзы Френеля луч света изменяет направление в целях получения необходимой проекции (рис. 38).

Рис. 36. Фонарь на основе линз Френеля (принцип):
1 – корпус; 2 – линзы Френеля

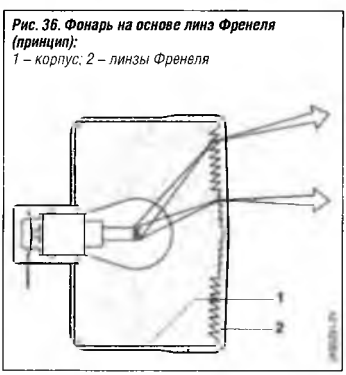
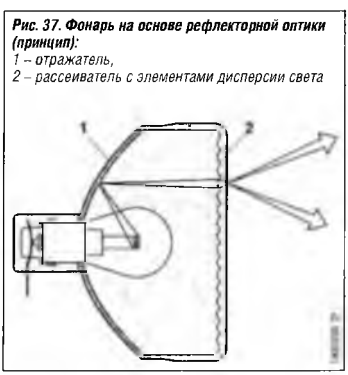


Рис. 37. Фонарь на основе рефлекторной оптики (принцип):
1 – отражатель,
2 – рассеиватель с элементами дисперсии света



В современных автомобилях используются в основном фонари с отражателями произвольной формы. Эти фонари дают наилучшие возможности адаптации к форме кузова и, следовательно, к доступному структурному пространству, и в то же время выдерживают требования к дизайну.

Фонари со светодиодами

Светодиоды (LED) все чаще используются в качестве источников света в фонарях. Светодиоды уже несколько лет используются в дополнительных стоп-сигналах. Здесь ключевым фактором является свобода в плане дизайна – возможность компактного исполнения с несколькими источниками света (рис. 39 и 40). Кроме того, светодиоды в стоп-сигналах – это дополнительная безопасность. Светодиод достигает максимальной светоотдачи менее чем за 1 мс, в то время как лампам накаливания требуется 200 мс для достижения номинального светового потока. Это означает, что светодиоды излучают сигнал торможения быстрее, что в свою очередь сокращает время реакции.

Благодаря своей более высокой эффективности в плане светового потока, яркости, термохарактеристик и механической конструкции светодиоды можно также использовать в областях с повышенными требованиями к освещению.

Что касается использования светодиодов в автомобильных фонарях, то они фундаментально отличаются от ламп накаливания и галогенных ламп тем, что не могут работать непосредственно от электрооборудования автомобиля. Им требуется определенное напряжение, которое, в зависимости от материала полупроводника, варьируется от 2,2 до 3,6 В, и определенный ток, регулирующий силу света. Для активации функций с низкими фотометрическими требованиями можно использовать решения на базе резисторов. В большинстве областей применения требуются линейные контроллеры или преобразователи постоянного тока. Электронику можно либо интегрировать в лампу, либо реализовать в самостоятельном ЭБУ, монтируемом на лампу или где-то в автомобиле.

Рис. 38. Фонарь произвольной формы с линзой Френеля (принцип):
1 – отражатель, 2 – линза Френеля, 3 – прозрачная линза

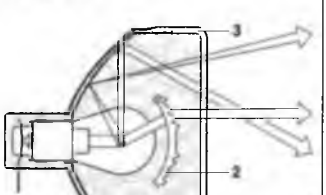


Рис. 39. Светодиодная фара с оптикой Френеля (принцип):
a – вертикальный разрез; b – вид сверху; 1 – оптика Френеля; 2 – светодиод

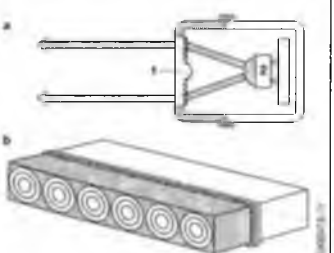
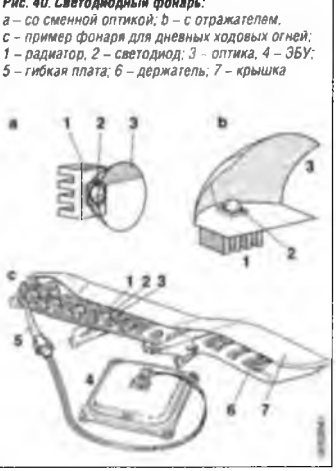


Рис. 40. Светодиодный фонарь:
a – со сменной оптикой; b – с отражателем; c – пример фонаря для дневных ходовых огней; 1 – радиатор, 2 – светодиод; 3 – оптика, 4 – ЭБУ; 5 – гибкая плата; 6 – держатель; 7 – крышка



Фонари с оптоволоконной технологией

С помощью оптических волноводов источник света можно отделить от точки его излучения. Чтобы получить нужный световой рисунок, требуются специальные пускатели лучей в оптических волноводах или оптически активные элементы на оптическом волноводе или перед ним. В качестве источников света можно использовать лампы накаливания, но их недостатком является высокий уровень инфракрасного излучения. Это вызывает необходимость использования термостойких материалов, таких как стекло и тепловые экраны. При использовании светодиодов, как «холодных» источников света, можно направлять свет непосредственно в прозрачный пластик, такой как поликарбонат (PC) или полиметилметакрилат (PMMA). Лампы с оптоволоконной технологией используются в основном для создания элементов дизайна – узких полос или тонких колец (рис. 41).

Системы адаптивного заднего освещения

До сих пор функции заднего освещения выполнялись с одноуровневым контуром. В зависимости от версии и конструкции получалась фиксированная сила света, которая должна была находиться в установленных правилами пределах для гарантирования минимальной видимости.

Большое количество датчиков (яркости, загрязнения, видимости, влажности и т.д.) означает, что автомобиль сегодня способен более

Рис. 41. Фонарь на базе оптоволоконной технологии (принцип):
a – конструкция и принцип работы; b – пример; 1 – оптический волновод, 2 – пускатель луча; 3 – фонарь(с отражателем и тепловым экраном) или светодиод

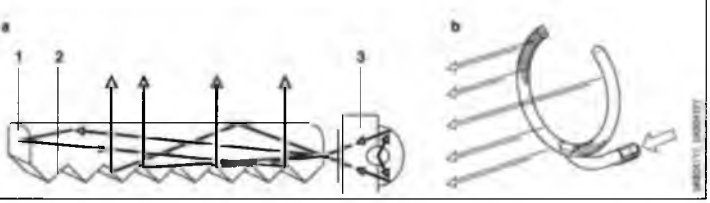
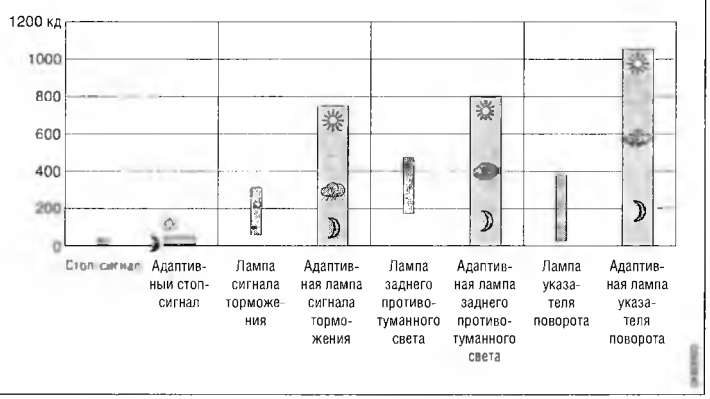


Рис. 42. Допустимая сила света для адаптивных задних фонарей



точно узнавать параметры окружающей среды и условия освещения. Для достижения оптимальной видимости (например, достаточной силы света без излишнего ослепления) органы заднего освещения будут способны варьировать силу излучаемого света в зависимости от окружающих условий, обнаруженных вокруг автомобиля. Например, стоп-сигнал будет работать в яркий солнечный день с большой силой света, а ночью – с меньшей, чтобы обеспечить оптимальное обнаружение и распределение действий водителя (рис. 42).

Освещение для удобства

Все чаще устанавливаются лампы, используемые у припаркованного автомобиля. Типичные области применения – подсветка зон в непосредственной близи от дверных проемов при открывании и закрывании дверей, лампы, обрисовывающие контуры автомобиля в нижней части кузова, и лампы, подсветки дверных ручек.

Функции, комбинирующие такие лампы с габаритными огнями и противотуманными фарами, получили название «проводи домой». Они активируются, к примеру, при отпирании дверей.

Регулировка фар

Регулировка фар дальнего и ближнего света

Правильная регулировка автомобильных фар – важнейший фактор безопасности движения в ночное время как для водителя, так и для тех, кто движется ему навстречу. Если луч будет направлен хотя бы чуть-чуть ниже, чем нужно, то произойдет существенное уменьшение геометрической дальности освещения (табл. 4). Если луч будет направлен хотя бы чуть-чуть выше, чем требуется, то водители встречных машин будут гораздо сильнее ощущать ослепление.

Правила, стандарты и оборудование

Регулировка фар в Европе

Начиная с 1 января 1998 г., в Европе стало обязательным наличие автоматической или ручной вертикальной коррекции фар у всех новых автомобилей, кроме случаев, когда другое оборудование (например, гидравлическая регулировка подвески) гарантирует, что угол наклона светового луча останется в предписанных пределах. Хотя это оборудование не является обязательным в других странах, его использование разрешено.

Система автоматической коррекции фар должна компенсировать состояние нагрузки путем опускания или подъема светового луча в диапазоне от 5 см / 10 м (0,5 %) до 25 см / 10 м (2,5 %).

Ручной корректор фар приводится в действие с места водителя и в базовом варианте должен иметь фиксатор положения; регулировка пучка света также выполняется из этого положения. Устройства с плавным и ступенчатым управлением характеризуются видимой разметкой в зоне ручного переключателя, которая должна соответствовать условиям нагружения автомобиля для необходимой регулировки вертикального наведения.

Таблица 4. Геометрическая дальность горизонтального компонента светотеневой границы ближнего света
Фара установлена на высоте 65 см

Отклонение светотеневой границы (1% = 10 см / 10 м)	%	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Размер регулировки *e*	см	10	15	20	25	30
Геометрическая дальность горизонтальной части светотеневой границы	м	65,0	43,3	32,5	26,0	21,7

Варианты конструкции

Во всех вариантах используется регулирующий механизм для вертикальной регулировки отражателя фары (конструкция корпуса) (рис. 43). Приборы ручного управления имеют переключатель, приводимый в действие водителем (рис. 44), в то время как автоматические регуляторы получают сведения от датчиков расположения оси и степени сжатия подвески, после чего передают соответствующие сигналы к средствам регулирования.

Гидромеханические системы

Гидромеханические системы работают по принципу перетекания жидкости по соединительным шлангам между ручным переключателем (или датчиком уровня) и элементами регулирования. Степень регулировки соответствует количеству перетекающей жидкости.

Вакуумные системы

У вакуумных систем ручной переключатель (или датчик уровня) регулирует вакуум от впускного трубопровода и передает его к устройствам регулировки, таким образом, получается переменная степень регулировки.

Электрические системы

В электрических системах в качестве регулирующих механизмов используется электрические редукторные двигатели. Управление ими осуществляется или с помощью соответствующих переключателей в автомобиле, или от осевых датчиков.

Регулировка света фар

Регулировка света фар в Европе

Правила и стандарты

Автомобили должны иметь фары, которые бы обеспечивали соответствующее освещение дороги без какого-либо ослепления водителей встречного потока автомобилей. Директивы ЕС (и, соответственно, требования статьи 50 StVZO [2] Правил регистрации транспортных средств в Германии) регламентируют необходимую регулировку фар по горизонтали и вертикали. Ослепление ближним светом считается предотвращенным, если освещенность не превышает 1 лк на расстоянии 25 м перед каждой фарой, когда луч проецируется на поверхность, перпендикулярную дороге на высоте центра фары и выше. Если же автомобиль подвергается очень большим механическим смещениям из-за изменения загрузки, то фары должны регулироваться таким образом, чтобы достичь нужного результата.

Директивы ECE R48 [12] и EEC 76/756 [24] определяют базовую регулировку и размеры. Для категорий автомобилей, не охватываемых этими директивами, применяются предписания ECE R48 или ECE R53 [13].

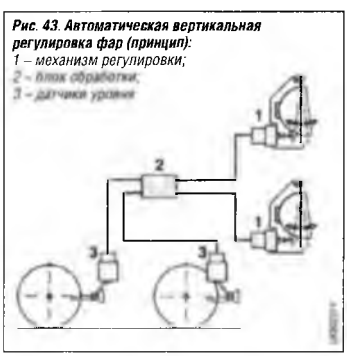


Рис. 43. Автоматическая вертикальная регулировка фар (принцип):
1 – механизм регулировки;
2 – блок обработки;
3 – датчики уровня

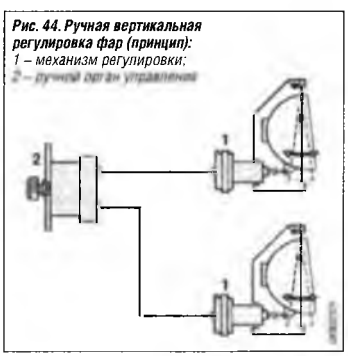


Рис. 44. Ручная вертикальная регулировка фар (принцип):
1 – механизм регулировки;
2 – ручной орган управления

Подготовка к регулировке
Загруженный автомобиль:
- транспортные средства, кроме мотоциклов, без нагрузки, 75 кг (один человек на водительском сиденье);
- мотоциклы: для ЕС (согласно 93/92/EEC, [25]) без нагрузки, без человека на водительском сиденье; для ECE и StVZO (Правил регистрации транспортных средств в Германии) без нагрузки, 75 кг (один человек на водительском сиденье).

Подвеска:
- автомобили без самовыравнивающейся подвески катятся несколько метров так, чтобы подвеска выровнялась;
- автомобили с самовыравнивающейся подвеской выводятся на нужный уровень согласно инструкции по эксплуатации.

Давление в шинах:
давление в шинах должно регулироваться в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобиля, по загруженному состоянию.

Обязательные проверки систем регулировки фар:
- автоматические системы должны эксплуатироваться согласно инструкции по эксплуатации;
- на автомобилях, зарегистрированных до 1.01.1990, положительно располагающееся положение регулятора не требуется;
- системы ручной коррекции с двумя положительно располагающимися положениями регулятора:
  на автомобилях, где луч фары поднимается по мере загрузки, регулятор должен быть установлен в положение, при котором луч находится в крайнем верхнем положении (минимальная степень наклона);
  на автомобилях, где луч фары опускается по мере загрузки, регулятор должен быть установлен в положение, при котором луч находится в крайнем нижнем положении (минимальная степень наклона).

Поверхность и условия испытаний:
- автомобиль и устройство для проверки фар должны стоять на плоской поверхности (согласно ISO 10604 [26]);
- регулировки и проверки должны выполняться в закрытом пространстве, где освещение не слишком яркое.

Регулировка и проверка с помощью устройства для регулировки фар:
- устройство для регулировки фар должно быть установлено на определенном расстоянии от фар (кроме случая с автоматическим оборудованием);
- если устройства для регулировки фар не перемещаются по направляющим, то вертикальную регулировку относительно продольной центральной оси автомобиля нужно выполнять отдельно для каждой фары. Затем проверку нужно выполнить, не сдвигая устройство вбок;
- если устройства для регулировки фар перемещаются по направляющим (или чем-то подобном), то вертикальную регулировку относительно продольной центральной оси автомобиля нужно выполнять только один раз в наиболее удобном положении (например, в центральном положении спереди автомобиля);
- в этом случае на устройстве регулировки фар нужно установить размер регулировки для данной фары, проверить регулировку фар и установить для фары нужную регулировку.

Регулировка и проверка с помощью проверочного экрана:
- проверочный экран должен быть перпендикулярен поверхности, на которой стоит автомобиль, и быть под прямым углом к продольной центральной оси автомобиля;
- проверочный экран должен быть светлым, иметь регулировку по вертикали и горизонтали и метки, изображенные на рис. 45;
- проверочный экран должен быть расположен на расстоянии 10 м от передней части автомобиля, чтобы центральная отметка совместилась с центром проверяемой или регулируемой фары (рис. 46). В случае с очень низко направленными фарами (например, противотуманными), можно выбрать более короткое расстояние путем соответствующего вычисления регулировочного размера;
- каждую фару нужно регулировать отдельно, поэтому другая фара или фары должны быть прикрыты;
- вертикальное положение проверочного экрана должно быть установлено так, чтобы верхняя граница (параллельная земле) была на высоте $h = H - e$. Если поверхность экрана не находится на расстоянии 10 м от автомобиля, то настройку e необходимо соответственно преобразовать.

Примечания по регулировке

В случае с ассиметричными фарами ближнего света и противотуманными фарами самое высокое положение светотеневой границы должно быть на верхнем срезе и проходить как можно более горизонтально по минимальной ширине проверочного экрана. Боковая регулировка фар должна быть такой, чтобы световое пятно располагалось как можно симметричнее относительно перпендикулярной линии, проходящей через центральную отметку.

В случае с ассиметричными фарами ближнего света светотеневая граница должна касаться верхнего среза слева от центра. Пересечение между левой секцией (которая должна быть как можно горизонтальнее) и наклонной секцией справа от светотеневой границы должно быть расположено на перпендикулярной линии, проходящей через центральную метку.

Центр дальнего света должен приходиться на центральную метку.

Рис. 45. Экран для проверки света фар:
1 – граничная линия; 2 – центральная метка;
3 – экран, 4 – точка разрыва;
H – высота центра фары над дорогой в см;
h – высота граничной линии над дорогой в см;
e = H - h – размер регулировки

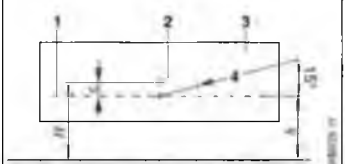


Рис. 46. Относительные положения проверочного экрана и продольной оси автомобиля:
1 – центральная метка;
2 – проверочный экран;
A – расстояние между центрами фар



У фар с общей регулировкой ближнего света и противотуманных фар или дальнего света, ближнего света и противотуманных фар нужно обязательно использовать в качестве базы для регулировки фару ближнего света (регулировочный размер *e*, см. табл. 5).

Устройства регулировки фар

Функция:

Автомобили должны иметь фары, которые бы обеспечивали соответствующее освещение дороги без какого-либо ослепления водителей встречного потока автомобилей. Для этой цели наклон лучей фар относительно ровной базовой поверхности и их направление к вертикальной продольной центральной плоскости автомобиля должны отвечать официальным директивам.

Конструкция оборудования:

Устройства для регулировки фар представляют собой переносные камеры получения изображения (рис. 47), состоящие из линзы и экрана, расположенного в фокальной плоскости линзы и жестко соединенного с ней. Экран имеет маркировочные деления в целях облегчения корректировки регулирования фары и может просматриваться оператором по обслуживанию оборудования посредством использования подходящих дополнительных приспособлений, таких, как окна и регулируемые преломляющие зеркала. В изображенном внизу устройстве регулировки фар наклон относительно осевой линии

Таблица 5. Регулировка света фар (выдержка из StVZO (Правила регистрации транспортных средств в Германии))

Тип транспортного средства, > 2 колес Положение фар: высота над дорогой	Размер регулировки «e»	
	Наклоненный луч	Противотуманный луч
Сертифицируется по 76/756/EEC или ECE R48 и StVZO, впервые зарегистрированные 1.01.1990 или позже, < 1200 мм	Настройка на автомобиле например ≡○10 %	–2,0 %
Впервые зарегистрированные 31 12 1989 или ранее, ≤ 1400 мм, и впервые зарегистрированные после 31 12 1989, > 1200 мм, но ≤ 1400 мм	–1,2 %	–2,0 %

фары (в см на фиксированном расстоянии 10 м) устанавливается посредством поворота ручки для перемещения экрана (табл. 4 и 5).

Устройство регулировки настраивается в соответствии с осевой линией автомобиля путем использования видоискателя, такого, как зеркало с линией ориентации. Оно поворачивается и настраивается таким образом, что линия ориентации равномерно касается двух внешних контрольных меток автомобиля. Камера получения изображения может передвигаться вертикально и закрепляется зажимом на уровне фары автомобиля.

Проверка фар

Фару можно проверить после правильного расположения оборудования перед рассеивателем. На экране появится изображение схемы распределения света, испускаемого фарой. Некоторые устройства оснащаются фотодиодами и дисплеем в целях получения измерений силы света.

У фар с асимметричной схемой распределения лучей ближнего света светотеневая граница должна касаться горизонтальной верхней отсечки; пересечение горизонтальной и наклонной секций должно находиться на перпендикулярной линии, проходящей через центральную метку (рис. 48). После регулировки светотеневой границы для ближнего света фар, центр дальнего света (предполагается, что дальний и ближний свет фар регулируются вместе) должен находиться в пределах прямоугольной границы вокруг центральной метки.

Регулировка фар в США

Для фар, отвечающих Федеральному законодательству США, все большее распространение получает визуальная (только вертикальная) регулировка, разрешенная с 1.05.1997. Регулировка света фар по горизонтали не производится.

До этого самым распространенным в США методом регулировки фар было использование механических регулирующих устройств. Приборы головного освещения оснащены тремя упругими прокладками на рассеивателе – одна для каждой из трех плоскостей регулировки. Напротив этих прокладок устанавливается калибровочное устройство. Регулировка проверяется по уровнемеру. С помощью метода VHAD (Vehicle Headlamp Aiming Device, устройство регулировки автомобильных фар), разрешенного с 1993 года, фары регулируются относительно фиксированной опорной оси автомобиля. Эта процедура выполняется с использованием уровнемера, прочно закрепленного на фаре. В результате эти три прокладки на рассеивателе больше не потребовались.

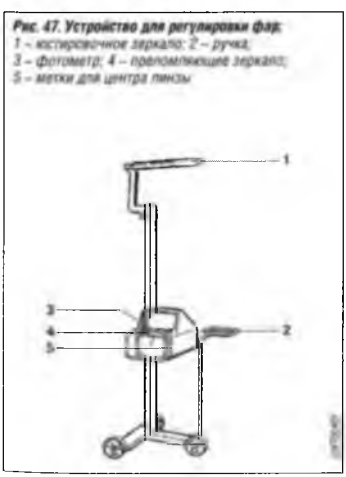


Рис. 47. Устройство для регулировки фар:
1 – юстировочное зеркало; 2 – ручка; 3 – фотометр; 4 – преломляющее зеркало; 5 – метки для центра линзы

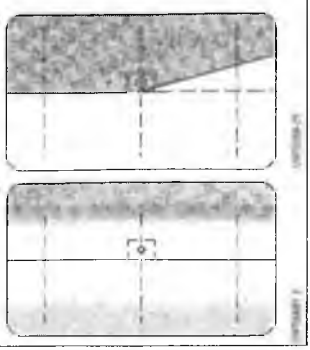


Рис. 48. Изображение на экране устройства для регулировки фар:
a – верхний обрез светотеневой границы на ассиметричном луче ближнего света; b – центральная метка для лучей дальнего света

Список литературы

[1] StVZO §22a: Bauartgenehmigung für Fahrzeugteile.
[2] StVZO §50: Scheinwerfer für Fern- und Abblendlicht.
[3] StVZO §52: Zusatzliche Scheinwerfer und Leuchten.
[4] ECE R3: Uniform provisions concerning the approval of retro-reflecting devices for power-driven vehicles and their trailers.
[5] ECE R4: Uniform provisions concerning the approval of devices for the illumination of rear registration plates of power-driven vehicles and their trailers.
[6] ECE R6: Uniform provisions concerning the approval of direction indicators for power-driven vehicles and their trailers.
[7] ECE R7: Uniform provisions concerning the approval of front and rear position (side) lamps, stop-lamps and end-outline marker lamps for motor vehicles (except motorcycles) and their trailers.
[8] ECE R19: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle front fog lamps.
[9] ECE R23: Uniform provision concerning the approval of reversing lamps for power-driven vehicles and their trailers.
[10] ECE R37: Uniform provisions concerning the approval of filament lamps for use in approved lamp units on power-driven vehicles and their trailers.
[11] ECE R38: Uniform provisions concerning the approval of rear fog lamps for power-driven vehicles and their trailers.
[12] ECE R48: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices.
[13] ECE R53: Uniform provisions concerning the approval of category 3 vehicles (motorcycles) with regard to the installation of lighting and light-signalling devices.
[14] ECE R65: Uniform provisions concerning the approval of special warning lamps for motor vehicles
[15] ECE R77: Uniform provisions concerning the approval of parking lamps for power-driven vehicles.
[16] ECE R87: Uniform provisions concerning the approval of daytime running lamps for power-driven vehicles.
[17] ECE R91: Uniform provisions concerning the approval of side-marker lamps for motor vehicles and their trailers.
[18] ECE R98: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps with gas-discharge light sources.
[19] ECE R99: Uniform provisions concerning the approval of gas-discharge light sources for use in approved gas-discharge lamp units of power-driven vehicles.
[20] ECE R112: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules.
[21] ECE R113: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting a symmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules.

[22] ECE R119: Uniform provisions concerning the approval of cornering lamps for power-driven vehicles.
[23] ECE R123: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles.

[24] 76/756/EEC: Council Directive of 27 July 1976 on the approximation of the laws of the Member States relating to the installation of lighting and light-signalling devices for motor vehicles and their trailers.
[25] 93/92/EEC: Council Directive of 29 October 1993 on the installation of lighting and light-signalling devices on two or three-wheeled motor vehicles.

[26] ISO 10604: Road vehicles; measurement equipment for orientation of headlamp luminous beams.
[27] FMVSS 108: Lamps, reflective devices, and associated equipment.

[28] SAE J186: Supplemental High Mounted Stop and Rear Turn Signal Lamps.
[29] SAE J222: Parking Lamps (Position Lamps).
[30] SAE J585. Tail Lamps (Rear Position Light).
[31] SAE J586: Stop Lamps for Use on Motor Vehicles Less Than 2032 mm in Overall Width.
[32] SAE J587: License Plate Lamps (Rear Registration Plate Lamps).
[33] SAE J588: Turn Signal Lamps for Use on Motor Vehicles Less Than 2032 mm in Overall Width.
[34] SAE J592e: Clearance, Side Marker and Identification Lamps.
[35] SAE J593c: Back-up Lamps.
[36] SAE J594: Reflex Reflectors.
[37] SAE J852: Front Cornering Lamps for Use on Motor Vehicles.
[38] SAE J2087: Daytime Running Light.

[39] Meschede, D: Gerthsen Physik. 23rd Edition, Springer-Verlag, 2006.
[40] Baer, R.: Beleuchtungstechnik: Grundlagen. 3rd Edition, Huss-Medien, 2006.

Автомобильные ветровые и боковые стекла

Свойства стекла

Базовые компоненты

Ветровые и боковые стекла для автомобилей изготавливаются из кварцевого стекла. Основные химические компоненты и их пропорции:

- диоксид кремния (SiO_2) как основной компонент стекла – 70–72%;
- оксид натрия (Na_2O) в качестве флюса – около 14%;
- оксид кальция (CaO) в качестве стабилизатора – около 10%.

Эти вещества смешиваются в виде кварцевого песка, кальцинированной соды и известняка. Другие оксиды, такие как оксид магния и оксид алюминия, добавляются в смесь в пропорциях до 5%. Эти добавки улучшают физические и химические свойства стекла.

Изготовление плоского стекла

Автомобильные стекла изготавливаются из базового продукта – плоского стекла, выплавляемого по флоат-технологии. При этой технологии смесь плавится при температуре 1560°C. Затем расплавленная масса проходит через зону очистки при 1500–1100°C и разливается в плавильные ванны с жидким оловом. Расплавленная масса нагревается сверху (сглаживание поверхности огневым полированием). Плоская поверхность расплавленного олова создает плоское стекло с плоскими параллельными поверхностями очень высокого качества (снизу – оловянная ванна, сверху – огневое полирование). Перед вынимании из ванны стекло охлаждается до температуры 600°C. После последующего медленного, ненапряженного охлаждения стекло разрезается на листы 6,10 × 3,20 м².

Олово хорошо подходит для флоат-технологии, так как является единственным металлом, не создающим давления пара при 1000 °C и находится в жидком состоянии при 600 °C.

Таблица 1. Механические характеристики и физические свойства стекла и готовых ветровых и боковых стекол

Свойство	Размеры	TSG	LSG
Плотность	кг/м³	2,500	2,500
Твердость	по Моосу	5–6	5–6
Прочность на сжатие	МН/м²	700–900	700–900
Модуль упругости	МН/м²	68,000	70,000
Прочность на изгиб до преднапряжения после преднапряжения	 МН/м² МН/м²	 30 [2] 50 [2]	 30 [1]
Удельная теплоемкость	кДж/кг · K	0,75–0,84	0,75–0,84
Коэффициент теплопроводности	Вт/м · K	0,70–0,87	0,70–0,87
Коэффициент теплового расширения	K^{-1}	$9{,}0 \cdot 10^{-6}$	$9{,}0 \cdot 10^{-6}$
Относительная диэлектрическая проницаемость		7–8	7–8
Коэффициент светопропускания (DIN 52 306), чистое стекло [3]	%	≈ 90	≈ 90 [1]
Показатель преломления [3]		1,52	1,52 [1]
Отклонение угла клина [3]	Угловые минуты	< 1,0 плоское < 1,5 изогнутое	≤ 1,0 плоское [1] ≤ 1,5 изогнутое [1]
Диоптрические искажения DIN 52305 [3]	Диоптрии	< 0,03	≤ 0,03 [1]
Тепловое сопротивление	°C	200	90 [1] (макс, 30 мин)
Сопротивление тепловому удару	K	200	

[1] Свойства готового триплексного безопасного стекла (LSG) Во время подсчета допустимого сопротивления на изгиб влияние пленки поливинилбутирола может не учитываться

[2] Расчетные значения, эти значения уже содержат необходимые допуски

[3] Показатели оптических свойств очень сильно зависят от типа стекла

Остекление автомобилей

Стекло, используемое для остекления автомобилей бывает двух типов:
- однослойное закаленное безопасное стекло (TSG), используемое в основном для бокового, заднего остекления и крышек люков;
- многослойное безопасное стекло (LSG), используемое в основном для ветровых и задних стекол, но также и для крышек люков. LSG все чаще устанавливается на боковые и задние стекла.

Материалы, из которых изготавливаются стекла TSG и LSG:
- прозрачное флоат-стекло – это стекло обеспечивает наилучшее светопропускание.
- тонированное флоат-стекло – это стекло имеет однородную зеленую или серую тонировку; тонировка препятствует проникновению солнечного тепла.
- флоат-стекло с покрытием – стекло с одной стороны покрыто благородным металлом и оксидами металлов; покрытие уменьшает проникновение тепла и ультрафиолетового излучения в салон, обеспечивая теплоизоляцию.

Стекла TSG

Стекла TSG отличаются от стекол LSG более высокой механической и тепловой прочностью, а также стойкостью к разрушению и устойчивостью к сотрясению. Боковые стекла TSG проходят процесс упрочнения, с помощью которого получается поверхность стекла с предварительным напряжением. При ударе эти стекла разбиваются на множество мелких осколков с тупыми краями (во избежание риска травмирования).

Обработка стекол TSG (шлифование, сверление) невозможна. Стандартная толщина составляет 3, 4 и 5 мм.

Стекла LSG

Стекло LSG изготавливается из стойкого к трещинам, гибкого промежуточного слоя – пленки из поливинилбутирала (PVB), вклеиваемой между двумя листами стекла. При ударе стекло LSG раскалывается с образованием сетчатого рисунка. Промежуточный слой удерживает куски разбитого стекла (во избежание риска травмирования). У разбитого стекла промежуточный слой сохраняет свою целостность и прозрачность.

Стандартная толщина составляет 4,5–5,6 мм.

Оптические свойства

Требования к оптическому качеству автомобильных стекол:
- беспрепятственный обзор;
- безупречный обзор;
- обзор без искажений.

Достижение оптимального оптического качества должно соотноситься со структурными требованиями и дизайном кузова, с учетом следующих факторов:
- остекление большой площади;
- плоское остекление;
- цилиндрические или сферические стекла;
- стекла с высокой степенью кривизны.

Причины возможного ухудшения качества:
- оптическое преломление;
- оптическое искажение;
- двоение.

Оптическое преломление увеличивается при:
- увеличении конусности, т.е. наклона окон
- увеличении толщины стекол;
- уменьшении радиуса кривизны (увеличении степени изгиба);
- увеличении отклонения от идеальной параллельности поверхностей исходного листа стекла.

Стекло с зеленой или серой тонировкой используется для поглощения тепла, так как оно блокирует пропускание инфракрасных лучей (излучение тепла) сильней, чем лучи с более короткой длиной волны. С другой стороны, оно также уменьшает пропускание лучей в пределах видимого спектра. Пленка PVB в стекле LSG поглощает свет в ультрафиолетовом диапазоне.

Оптические характеристики стекол на основе TSG и LSG являются приблизительно одинаковыми. Оптические свойства пленки поливинилбутирола приближены к характеристикам стекол в видимом спектре.

Функции остекления

Требования к остеклению непрерывно растут. Использовавшиеся в прошлом плоские стекла служили лишь для защиты пассажиров от ветра и непогоды. Ныне остекление автомобилей выполняет широкий спектр функций.

Остекление с тонировкой

Это стекло, тонированное в процессе изготовления и уменьшающее прямое проникновение солнечных лучей в салон.

Уменьшение пропускания солнечной энергии происходит в основном в длинноволновом спектре (инфракрасном, рис. 1), и это уменьшает передачу тепла в салон. Степень влияния на пропускание света в видимом спектре зависит от степени тонировки и толщины стекла.

У ветровых стекол коэффициент пропускания света должен составлять не менее 75%. Сильно тонированное стекло с коэффициентом пропускания света менее 70% можно использовать в стеклах задних дверей, если автомобиль имеет два наружных зеркала. Для крышек люков используется тонированное стекло со значительно меньшим коэффициентом пропускания света и пропусканием ультрафиолетовых лучей ≤ 2 %.

Стекла с покрытием

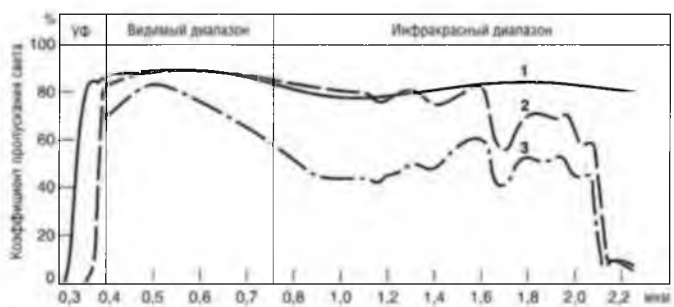
При остеклении этого типа используется стекло с металлическим или металоксидным покрытием. В зависимости от технологии покрытие может быть нанесено до или после выгибания и предварительного напряжения стеклянного листа. Покрытие наносится на внутреннюю поверхность стекла LSG.

Коэффициент пропускания света такого стекла с покрытием меньше 70 %. Поэтому его можно устанавливать на задние двери, если автомобиль имеет два наружных зеркала.

Стекло с покрытием можно также использовать для крышек люков. Также используются стекла с пиролитическим покрытием, подвергаемые обработке после нанесения металлического покрытия.

Стекло с покрытием уменьшает проникновение прямых солнечных лучей в салон и поглощает солнечную энергию в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра.

Рис. 1. Коэффициент пропускания света автомобильного ветрового стекла:
1 – флоат-стекло и стекла TSG, толщина 4 мм, не тонированное; 2 – стекла LSG, общая толщина 5,5 мм, не тонированное, 3 – стекла LSG, общая толщина 5,5 мм, зеленое



Ветровые стекла с защитным покрытием

На внутреннюю поверхность внешнего или внутреннего слоя стекла в триплексном варианте наносится специальное покрытие. Это покрытие – многослойное, в качестве базового слоя используется серебро. Поскольку покрытие наносится на внутреннюю поверхность триплекса, то оно на весь срок службы защищено от коррозии и царапин.

Это покрытие предназначено для уменьшения пропускания солнечной энергии более чем на 50 %. Это уменьшает нагрев салона. Светопропускание уменьшается в основном в инфракрасном диапазоне, т.е. пропускание видимой части спектра изменяется очень незначительно. Уменьшение достигается большей частью за счет отражения, вторичное отражение в салон небольшое. Коэффициент пропускания света этого стекла в ультрафиолетовом диапазоне очень низкое, меньше 1%.

Остекление люков триплексом

Гнутое триплексное стекло состоит из двух слоев тонированного стекла, которые частично предварительно напряжены термически для повышения механической прочности. Между ними вклеивается очень стойкая к разрыву, особым образом тонированная пленка. Общая ее толщина зависит от площади стекла и общей конструкции люка.

Поглощение лучей, в основном инфракрасной части спектра, гарантирует минимальное проникновение тепла. Покрытие также обеспечивает низкое пропускание и полную фильтрацию ультрафиолетовых лучей.

Автомобильное изолирующее стекло

Автомобильное изолирующее стекло изготавливается из двух плоских или гнутых листов однослойного закаленного безопасного стекла (3 мм), разделенных воздушным зазором (3 мм). Этот тип изолирующего стекла уменьшает нагрев салона, особенно в сочетании с тонированным покрытием. Светопропускание уменьшается в основном в инфракрасном диапазоне, т.е. пропускание видимой части спектра изменяется очень незначительно.

Изолирующее стекло также улучшает теплоизоляцию зимой и звукоизоляцию.

Изолирующее стекло сегодня используется только в автобусах, поездах и самолетах.

Многослойное безопасное стекло с подогревом

Многослойное безопасное стекло с подогревом можно использовать для ветровых и задних стекол. Они предотвращают обледенение и запотевание стекол, даже при очень низких температурах и обеспечивают хорошую видимость.

Многослойное безопасное стекло с подогревом состоит из двух листов стекла с вклеенной между ними пленкой PVB. Внутри пленки PVB имеются нити нагрева, которые могут быть тоньше 20 мкм, в зависимости от необходимой мощности. Нити нагрева могут быть проложены волнами или прямыми линиями, вертикально или горизонтально. Нагрев может охватывать всю площадь стекла или быть поделен на отдельные зоны с разной мощностью нагрева. Таким образом, можно предотвратить примерзание дворников к ветровому стеклу при отрицательных температурах.

Стекла с обогревом можно также создать путем наслаивания.

Автомобильное стекло с антенной

В стекле этого типа имеется встроенная антенна. В случае, когда стекла и крышка люка изготавливаются из однослойного закаленного безопасного стекла, антенна печатается на стекле и почти незаметно размещается на внутренней поверхности стекла. У триплексных ветровых стекол антенна встраивается или печатается на внутренней пленке.

Акустическое остекление

Акустическое ветровое стекло, как любое ветровое стекло, состоит из отдельных листов стекла – внешнего и внутреннего, прочно соединенных между собой пленкой из поливинилбутирала (PVB). Однако в случае с акустическим остеклением вместо обычной пленки PVB устанавливается акустическая пленка PVB, имеющая сердцевину с очень высоким уровнем шумоподавления, расположенную между двумя слоями стандартной пленки PVB. Внешние слои обычной пластиковой пленки обеспечивают механические свойства, а звукоизолирующая сердцевина поглощает вибрации.

Акустические ветровые стекла уменьшают проникновение низкочастотных вибраций двигателя в салон. Вибрация двигателя поглощается ветровом стеклом, уменьшение гула на низких частотах составляет до 5 дБ.

Водоотталкивающее остекление

Специальное покрытие на стекле заставляет воду собираться в мельчайшие капли во время дождя. Они сдуваются со стекла потоком воздуха.

Такое покрытие можно нанести на любые стеклянные поверхности. Через несколько лет эксплуатации эффективность водоотталкивающего остекления может быть полностью восстановлена.

Электрохромное остекление

В стандартном исполнении электрохромное стекло состоит из двух слоев стекла толщиной по 2,1 мм и тонкого промежуточного слоя, общая толщина составляет 5,8 мм, удельная масса – 16 кг/м^2. В зависимости от размера стекла, светопропускание может быть полностью изменено за 30–60 секунд. Это время реагирования остается постоянным в диапазоне температур: от –25 до +90 °С. Стекло остается прозрачным при любом затемнении, т.е. оно никогда не становится матовым. Для активации стекла требует питание напряжением ±1,5 В. Потребляемая мощность крайне мала – менее 0,1 Вт ч/цикл/м^2.

Предпочтительными областями применения электрохромного остекления являются крышки люков, задние стекла и треугольные стекла у задних стоек.

Панорамные крыши

Имеется широкий выбор панорамных крыш – от закрытых, большой площади, до двойных, многопанельных и пластинчатых.

Для панорамных крыш можно использовать следующие стекла:

- однослойное безопасное стекло толщиной 5 или 4 мм;
- традиционное триплексное безопасное стекло толщиной 6 или 5 мм;
- частично напряженное триплексное безопасное стекло толщиной 5 мм.

Очистка ветрового и заднего стекол и фар

Задача систем очистки ветрового и заднего стекол и фар – обеспечение водителю достаточной видимости в автомобиле. Используются следующие типы систем:
- системы стеклоочистителей ветрового стекла;
- системы стеклоочистителей заднего стекла;
- системы омывателей в сочетании с системами очистителей;
- системы стеклоомывателей фар.

Рис. 1. Системы очистки ветровых стекол:
a – тандемная система, b – система со встречным рисунком; c – система с одним рычагом и управляемой щеткой; d – система с одним рычагом и неуправляемой щеткой (задний стеклоочиститель); e – система с одним рычагом и тактовым управлением

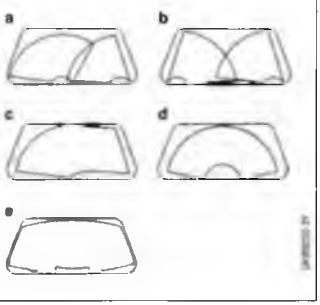
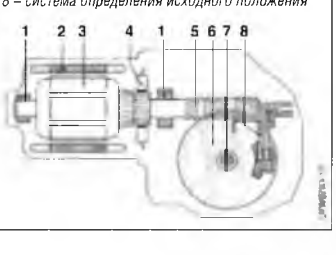


Рис. 2. Двигатель стеклоочистителя с червячной передачей:
1 – подшипник; 2 – магнит; 3 – двигатель; 4 – коллектор с угольными щетками, 5 – червяк; 6 – червячное колесо, 7 – выходной вал, 8 – система определения исходного положения



Системы очистителей ветрового стекла

Функции и требования

Задача систем стеклоочистителей – удаление воды, снега и грязи (минеральной, органической и биологической) с ветрового и заднего стекол. Граничные условия:
- работает при высокой (+80 °C) и низкой (–40 °C) температуре;
- коррозионная стойкость к кислотам, основаниям, солям, озону;
- прочность под нагрузкой (например, из-за большого количества снега);
- защита пешеходов;
- чистящий эффект на высоких скоростях;
- низкий уровень шума.

Законодательные органы перевели потребность в адекватной видимости в стандартизированные зоны видимости на ветровом стекле (например, ЕЕС для Европы [1] и FMVSS для США [2]). Они подразделяются на несколько зон и должны очищаться системой очистителей до фиксированного уровня в %. Самые важные системы очистителей для ветровых стекол легковых автомобилей, отвечающие этим требованиям, показаны на рис. 1.

Системы очистителей для грузовиков похожи на системы для легковых автомобилей, но должны отвечать другим требованиям, особенно в плане скорости движения и формы ветрового стекла.

Привод

Системы стеклоочистителей ветрового стекла состоят из электродвигателя и механизма с червячной передачей, системы соединений, подшипников стеклоочистителей, рычагов и щеток.

Конструкция двигателя

Электродвигатели постоянного тока с постоянным магнитом и встроенными механизмами с червячной передачей (рис. 2) используются для привода систем стеклоочистителей. Двигатели по конструкции высокоскоростные, что обусловлено стоимостью, массой и пространственными ограничениями. Необходимые скорость и крутящий момент в системе стеклоочистителей достигаются с помощью механизма с червячной передачей.

Главная задача приводов стеклоочистителей – гарантировать видимость на дороге при ожидаемых условиях, т.е. достаточно частое протирание ветрового стекла. Для систем стеклоочистителей ветрового стекла – это порядка 40 раз в минуту, а при экстремальных условиях – около 60 раз. В стандарте SAE J903 [3] регламентированы скорость вращения 45 мин$^{-1}$ и скачок скорости не менее 15 циклов в минуту.

Часто используемая для электрических машин классификация по выходной мощности не подходит для приводов систем стеклоочистителей. Системы стеклоочистителей обычно работают на мокром ветровом стекле; в этом случае требуется минимальный крутящий момент двигателя на высоких оборотах. С другой стороны, в состоянии большой нагрузки, например, при примерзании дворников, требуется большой крутящий момент при низких оборотах. В обоих случаях выходная мощность (произведение крутящего момента и скорости вращения) мала. Поскольку переменная привода зависит от необходимого крутящего момента в точке большой нагрузки, этот момент используется в качестве классификационной особенности.

Традиционные приводы

Традиционные приводы (роторные) характеризуются тем, что выходной вал двигателя постоянно вращается в одном направлении. Фактический момент на лобовом стекле определяется системой рычагов очистителя и его кинематической схемой (рис. 3).

Различные настройки скорости в таких системах достигаются благодаря наличию третьей угольной щетки, подключенной к плюсу аккумуляторной батареи в дополнение к угольным щеткам, соединенным с массой и плюсом аккумуляторной батареи. Эта третья угольная щетка находится под определенным углом к другим щеткам и в результате этого коммутационного угла происходит изменение характеристики двигателя (рис. 4, а).

Приводы очистителей имеют систему датчиков, следящих за тем, как щетки очистителей принимают правильное исходное положение. Поскольку положение выходного вала традиционного привода имеет соотношение

Рис. 3. Традиционный (роторный) привод:
a – параллельный привод; b – последовательный привод; 1 – кривошип двигателя; 2 – шатун; 3 – тяга кривошипа возвратно-поступательного движения в качестве шаровой пяты; 4 – кривошип возвратно-поступательного движения; 5 – подшипник стеклоочистителя; 6 – рычаг стеклоочистителя; α – угол вращения двигателя, β, γ – углы очистки (β и γ могут различаться), стрелки показывают направление движения.

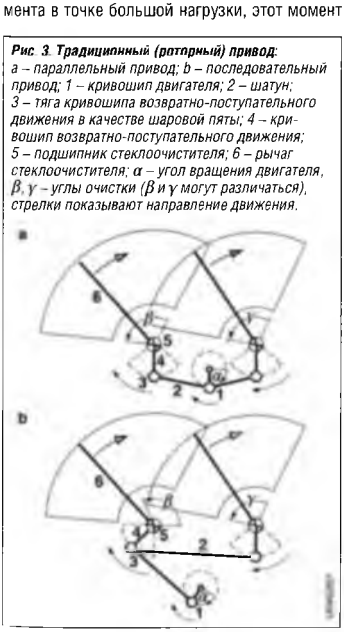


Рис. 4. Характеристики приводов стеклоочистителей:
a – традиционный привод стеклоочистителя;
b – реверсируемый привод стеклоочистителя,
1 – настройка скорости 1;
2 – настройка электрического тока 1;
3 – настройка скорости 2;
4 – настройка тока 2;
5 – электрический ток, режим реверсирования



1:1 с углом очистки, то эта функция может быть гарантирована с опорным положением на выходе. Для определения исходного положения используются микровыключатели с кулачковой активацией, ползуны с контактными дисками или датчики Холла с магнитом.

Приводы очистителей имеют защиту от перегрузки и блокировки. Эта защита может обеспечиваться традиционно - термостатическим выключателем, или датчиком блокирования / перегрузки.

Реверсируемые приводы

В случае с реверсируемыми приводами выходной вал колеблется под определенным углом, обычно менее 180°. Крутящий момент на валах очистителей, как и в случае с традиционными системами, обеспечивается через систему рычагов.

Реверсируемые приводы, в отличие от традиционных роторных, имеют только две угольные щетки. Необходимое напряжение для различных частот очистки (рис. 4, b) подается через встроенную управляющую электронику.

Положение и скорость выхода имеют отношение к управлению приводом. Эти переменные фиксируются датчиками (например, датчиками Холла с магнитом) и обрабатываются управляющей электроникой. Сигналы от системы датчиков обычно используются для обнаружения исходного положения. Защита от перегрузки и блокировки также гарантируется встроенной электроникой.

Система рычагов

Функции

Система рычагов служит для соединения привода с одним или более стеклоочистителями. Она передает крутящий момент привода через коленчатый рычаг с шаровой пятой на шарнирные тяги, и через них – на шаровую пяту стеклоочистителя (рис. 3). Решающей переменной здесь является угол очистки, т.е. угол между верхним упором щетки рядом с передней стойкой и нижним упором рядом с нижним краем ветрового стекла. В сочетании с длиной рычагов и щеток стеклоочистителей и положением подшипников стеклоочистителей относительно ветрового стекла это дает поле обзора.

Концепция системы

Применительно к системам рычагов различают чисто механические системы очистителей (роторные приводы) и электронно управляемые системы на базе реверсивной технологии. Ниже перечислены четыре наиболее важных концепции современных систем стеклоочистителей.

- Роторный привод: привод вращается, и система рычагов преобразует круговое движение в возвратно-поступательное движение стеклоочистителей (рис. 3).
- Реверсивная технология: электронно управляемый привод поворачивается менее чем на один оборот. Система рычагов передает усилие привода на стеклоочистители. Преимущество таких систем над роторным приводом состоит в том, что для системы рычагов требуется примерно вдвое меньше места.
- Система стеклоочистителей с двумя электродвигателями: каждый стеклоочиститель приводится в действие собственным электродвигателем с системой рычагов.
- Прямой привод стеклоочистителя: стеклоочиститель напрямую соединен с валом привода; система рычагов не требуется.

Крепление к кузову

В зависимости от концепции системы стеклоочистителей возможны разные способы крепления системы к кузову. На угол очистки влияет положение привода относительно стеклоочистителей и положение подшипников стеклоочистителей относительно автомобиля. Этот угол, в свою очередь, является одной из решающих переменных для обеспечения поля зрения, регламентируемого законодательством.

Для упрощения установки на автомобиль и ограничения допусков угла очистки система стеклоочистителей выполняется с фасонной трубкой или фасонным литьем в качестве компактной системы, и крепится к приводу и подшипникам.

В качестве альтернативы этой компактной конструкции привод и подшипники стеклоочистителей могут также приворачиваться непосредственно к кузову (соединение с незакрепленной связью); фасонная трубка не требуется. Это позволяет избавиться от ряда деталей в системе стеклоочистителей, но увеличивает объем монтажных работ изготовителя, так как с автомобилем нужно

соединить больше деталей. Кроме того, это повышает требования к жесткости кузова и обуславливает повышенную точность при установке компонентов для обеспечения точности угла очистки.

В зависимости от положения привода относительно подшипников стеклоочистителей используется либо параллельное соединение (т.е. оба стеклоочистителя приводятся в действие непосредственно электродвигателем, рис. 3, a), либо последовательное соединение (т.е. привод приводит в действие только один стеклоочиститель, а второй стеклоочиститель соединен с первым, рис. 3, b).

В случае с двухмоторными системами и прямым приводом стеклоочистителей приводы крепятся непосредственно к кузову.

Важно оптимизировать систему рычагов так, чтобы система стеклоочистителей работала согласованно, т.е. чтобы скребок стеклоочистителя двигался по стеклу равномерно. Плавная работа и уменьшение шума при реверсировании стеклоочистителей достигаются максимальными значениями углового ускорения и углов передачи силы рядом с точками реверсирования стеклоочистителей на внешнем и нижнем краях ветрового стекла.

Большие углы очистки или сложные передаточные отношения в определенных ситуациях означают сильное изменение скорости движения стеклоочистителей в углах ветрового стекла, вызванное изменением соотношений рычагов. По этой причине в некоторых автомобилях используются перекрестные рычаги (рис. 5).

Электронно-управляемые системы стеклоочистителей учитывают современную тенденцию к снижению массы и выбросов CO_2. Электронное управление приводами значительно уменьшает пространство, занимаемое тягами системы рычагов. Монтажное пространство можно уменьшить еще больше, если использовать два электропривода, значительно меньших по размеру.

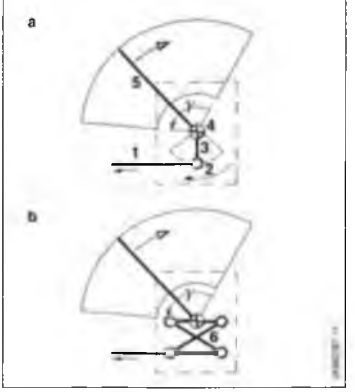
При прямом приводе стеклоочистителей можно также отказаться от системы рычагов двухмоторной системы.

Электронно-управляемые системы стеклоочистителей позволяют реализовать дополнительные функции – например, расширенное исходное положение, защиту от перегрузки (например, для снега), бесконечно регулируемую скорость очистки и равномерно широкая очищаемую полосу при изменяющихся условиях эксплуатации (например, скорости движения).

Рычаги стеклоочистителей

Рычаг стеклоочистителя – это связующее звено между системой тяг и щеткой. Он приворачивается к валу конического подшипника стеклоочистителя своим монтажным концом, который обычно изготавливается из литого алюминия или листовой стали. Другой конец обычно представляет собой стальную полосу, к которой прикреплена щетка (рис. 6). Различают крюковое, боковое и фронтальное крепления (рис. 7).

Рис. 5. Рычажный механизм системы стеклоочистителя:
a – традиционная система рычагов;
b – перекрестные рычаги;
1 – шатун; 2 – тяга кривошипа возвратно-поступательного движения в качестве шаровой пяты; 3 – кривошип возвратно-поступательного движения; 4 – подшипник стеклоочистителя; 5 – рычаг стеклоочистителя; 6 – перекрестные рычаги, γ – угол очистки; стрелки показывают направление движения



Подшипник стеклоочистителя приворачивается к кузову. Положение рычага стеклоочистителя относительно ветрового стекла определяется положением подшипника стеклоочистителя относительно лобового стекла. Поле зрения зависит от длины щетки и угла очистки.

Наряду со стандартной конструкцией существует ряд ее вариантов. Имеются также специальные конструкции рычагов стеклоочистителей, выполняющие, например, следующие дополнительные функции:

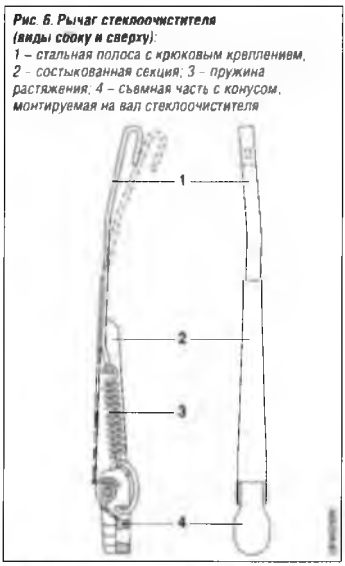


Рис. 6. Рычаг стеклоочистителя (виды сбоку и сверху):
1 – стальная полоса с крюковым креплением, 2 – состыкованная секция; 3 – пружина растяжения; 4 – съемная часть с конусом, монтируемая на вал стеклоочистителя

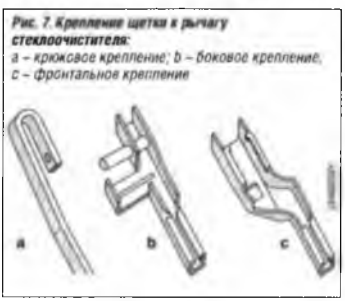


Рис. 7. Крепление щетки к рычагу стеклоочистителя:
a – крюковое крепление; b – боковое крепление, c – фронтальное крепление

Рычаг стеклоочистителя с 4 тягами с возвратно-поступательным движением
Рычаг стеклоочистителя с 4 тягами с возвратно-поступательным движением особым образом смещает рисунок чистки на ветровом стекле, обычно со стороны пассажира. Это уменьшает размер невытираемой зоны в верхнем углу ветрового стекла.

Рычаг стеклоочистителя с управляемой щеткой
Рычаг стеклоочистителя с управляемой щеткой обеспечивает дополнительное вращение скребка относительно рычага, чтобы, к примеру, можно было вытирать стекло параллельно передней стойке у систем только с одной щеткой (рис. 1. c).

Параллелограммный рычаг стеклоочистителя
Параллелограммный рычаг стеклоочистителя – это особый тип рычага с управляемой щеткой. Он удерживает щетку в фиксированном положении на протяжении всего цикла очистки (например, в вертикальном положении у городских автобусов).

Позиционирование щетки стеклоочистителя
Вторым шагом по оптимизации работы механизма стеклоочистителя является выбор рабочего положения кромки щетки стеклоочистителя относительно поверхности ветрового или заднего стекла. Положение щеток определяется угловым положением подшипников стеклоочистителя по отношению к ветрового стеклу и дополнительным кручением рычагов стеклоочистителей. Цель – наклонить рычаги стеклоочистителей сбоку в точках реверсирования в сторону биссектрисы угла чистки. Это помогает элементам щеток повернуться в свое новое рабочее положение. Это, в свою очередь, уменьшает износ щеток и шум при возврате в исходное положение.



Рис. 8. Элемент щетки в рабочем положении:
1 – зажимной кронштейн, 2 – подпружиненная полоса, 3 – закраина элемента щетки, 4 – ветровое стекло, 5 – двойная микрокромка

Щетки стеклоочистителей

Элемент щетки стеклоочистителя

Самым важным компонентом системы стеклоочистителей является резиновый элемент щетки. Резиновый элемент удерживается зажимами кронштейна (рис. 9) или поддерживается пружинными пластинами. Кромка резинового элемента касается ветрового стекла на ширине 0,01–0,015 мм. Во время движения по поверхности ветрового стекла элемент преодолевает сухое трение (коэффициент равен 0,8–2,5 в зависимости от влажности воздуха) и мокрое трение (коэффициент трения равен 0,6–0,1 в зависимости от скорости скольжения). Правильное сочетание профиля «стеклоочиститель – резиновый элемент» и характеристика резины должны быть выбраны таким образом, чтобы очищающая кромка стеклоочистителя могла стирать пыль или грязь с полной поверхности зоны очистки ветрового стекла под углом, приблизительно равным 45° (рис. 8).

Двойная щетка, с двухкомпонентным элементом из синтетического каучука состоит из специально задубленного, стойкого к истиранию элемента, соединенного с очень мягкой основой. Мягкая основа обеспечивает оптимальные характеристики реверсирования чистящего элемента и мягкую чистку.

Традиционная щетка стеклоочистителя

Щетка стеклоочистителя (рис. 9) несет на себе двойной элемент, направляя его движение по ветровому стеклу. Используются щетки длиной 260–1000 мм. Их установочные размеры (например, для крюкового или защелкивающегося крепления) стандартизированы. Минимальный износ во время работы достигается путем устранения люфта в опорах и сочленениях. Верхние части центральных кронштейнов перфорированы в целях предупреждения сдувания щетки при высоких скоростях. В отдельных случаях аэродинамические дефлекторы объединяются вместе с рычагами стеклоочистителя или щетками для создания прижимающего усилия щеток к ветровому стеклу.

Плоская щетка (щетка aero)

Плоская щетка (щетка aero) – современная тенденция в дизайне щеток стеклоочистителей (рис. 10). Контактное давление на элементе

Рис. 9. Традиционная щетка стеклоочистителя: *a – щетка под нагрузкой; b – при нулевой нагрузке, c – сечение, 1 – элемент щетки, 2 - зажимной кронштейн; 3 – сочленение; 4 – центральный кронштейн; 5 – переходник; 6 – подпружиненная полоса*

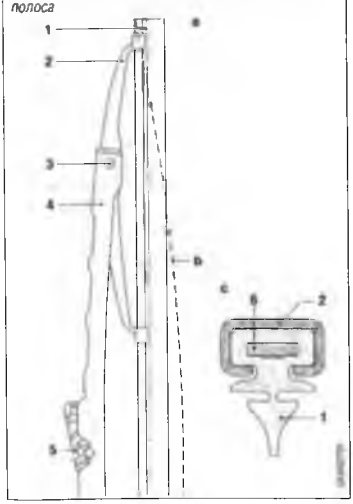
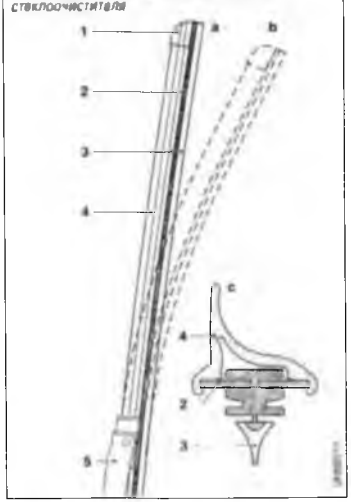


Рис. 10. Плоская щетка (щетка aero)
a – щетка под нагрузкой, b – при нулевой нагрузке, c – сечение, 1 – торцевая клипса, 2 – подпружиненная полоса, 3 – элемент щетки стеклоочистителя, 4 – спойлер, 5 – рычаг стеклоочистителя



распределяется уже не зубцами кронштейна стеклоочистителя, а двумя подпружиненными полосами, специально адаптированными к форме ветрового стекла. Они более равномерно придавливают элемент щетки к ветровому стеклу. Это уменьшает износ элемента и повышает качество чистки. Кроме того, избавление от системы с кронштейнами означает отсутствие износа тяг, существенное уменьшение общей высоты системы стеклоочистителей, уменьшение массы и менее шумную работу стеклоочистителей (уменьшается также шум ветра).

Верхняя кромка щетки имеет форму спойлера (воздухоотводящего элемента) и позволяет использовать щетку без модификаций даже на очень высокой скорости. Также намного уменьшается вероятность травмирования пешеходов гибким материалом спойлера при ДТП (защита пешеходов).

Адаптированное, упрощенное соединение с рычагом стеклоочистителя обеспечивает надежное крепление щетки при работе стеклоочистителей и удобную замену при ее необходимости.

Датчик дождя

Датчик дождя (см. «Датчики») определяет интенсивность дождя и отправляет соответствующий сигнал на двигатель стеклоочистителя. Двигатель включается и работает в прерывистом режиме или на 1-й или 2-й скорости, в зависимости от ситуации.

Полный потенциал датчика дождя полностью реализуется с электронно-управляемой системой стеклоочистителей, скорость работы которых можно непрерывно адаптировать к интенсивности дождя.

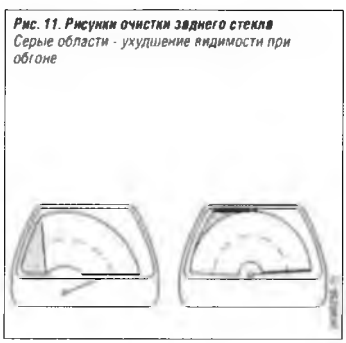


Рис. 11. Рисунки очистки заднего стекла
Серые области - ухудшение видимости при обгоне

Системы стеклоочистителей заднего стекла

Функции и требования

Системы стеклоочистителей заднего стекла используются тогда, когда заднее стекло, в силу угла наклона или формы кузова склонно к сильному загрязнению и ухудшению заднего обзора. Принцип очистки заднего стекла в общем аналогичен принципу очистки ветрового стекла.

К системе очистки заднего стекла предъявляются гораздо меньшие требования, чем к очистке ветрового. Поэтому система очистки заднего стекла часто работает в прерывистом режиме, и поле зрения здесь не регламентируется законодательно. Угол очистки, как правило, варьируется от 60° до 180° (рис. 11).

Приводы задних стеклоочистителей

Приводы задних стеклоочистителей по сути такие же, как и приводы передних. Система задних стеклоочистителей обычно приводится электродвигателем со встроенным механизмом возвратно-поступательного движения, выполняющим функцию системы тяг в системах очистки ветрового стекла и обеспечивающим возвратно-поступательное движение выходного вала (рис. 12). Рычаг стеклоочистителя напрямую соединен с выходным валом привода.

Чтобы увеличить угол очистки, одновременно занимая минимальное пространство, разработаны решения, где классический механизм с четырьмя тягами увеличивает угол возвратно-поступательного движения до 180° посредством дополнительного поворотного относительного движения.



Рис. 12. Привод заднего стеклоочистителя с механизмом возвратно-поступательного движения:
1 – подшипник; 2 – магнит; 3 – двигатель; 4 – коллектор с угольными щетками; 5 – червячное колесо; 6 – червяк; 7 – механизм возвратно-поступательного движения; 8 – выходной вал

Системы омывателей ветрового и заднего стекол

Конструкция

В целях обеспечения достаточной видимости через очищаемую зону необходимо обязательное наличие омывателя. Центробежные насосы с электроприводом подают воду с моющим средством из бачка через 2–4 форсунки точечными струями или через разбрызгивающие форсунки в распыленном виде на ветровое стекло (рис. 13). Емкость бачка с омывающей жидкостью обычно составляет 1,5–2 л. Если из этого же бачка омываются и фары, то может потребоваться увеличение емкости до 7 л. Для системы очистки заднего стекла требуется отдельный бачок.

Электронная система управления

Система омывателей часто соединяется с системой очистки посредством электронной системы управления, чтобы вода разбрызгивалась на заднее или ветровое стекло, пока нажата кнопка. Затем система очистителей продолжает работать несколько дополнительных циклов после отпускания кнопки.

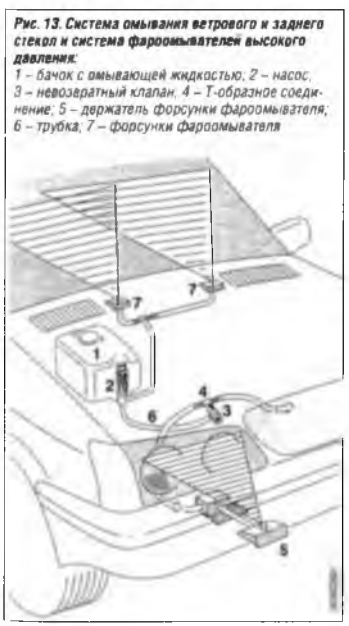


Рис. 13. Система омывания ветрового и заднего стекол и система фароомывателей высокого давления:
1 – бачок с омывающей жидкостью; 2 – насос; 3 – невозвратный клапан; 4 – Т-образное соединение; 5 – держатель форсунки фароомывателя; 6 – трубка; 7 – форсунки фароомывателя

Системы стеклоомывателей фар

Для очистки фар созданы чисто омывающие системы. Преимущества системы фароомывателей над использовавшимися ранее системами очистки/омывания – более простая конструкция и адаптация к дизайну автомобиля.

Система фароомывателей законодательно предписана в Германии для ксеноновых фар во избежание ослепления встречного транспорта из-за рассеяния света.

Конструкция

Системы омывателей высокого давления (рис. 13) состоят из бачка для омывающей жидкости (необходимая омывающая жидкость берется из системы омывания ветрового стекла), насоса, трубок с невозвратным клапаном и держателей с одной или несколькими форсунками. Для крепления распылительных форсунок, кроме широко применяющихся неподвижных держателей на бампере автомобиля, также используются телескопические держатели. Телескопические держатели улучшают очищающий эффект, потому что могут принять оптимальное положение для разбрызгивания. Более того, когда система находится в нерабочем положении, держатель форсунки может быть утоплен – например, в бампер.

Очищающий эффект

Очищающий эффект в основном определяется импульсной подачей водяных струй на поверхность рассеивателя. Здесь решающими факторами являются расстояние между форсунками и фарой, размер, угол падения капель омывающей жидкости и их скорость при касании фар, а также объем омывающей жидкости. Сопла должны располагаться так, чтобы струи воды охватывали фары при любых скоростях движения.

Список литературы

[1] Council Directive 78/318/EEC: Wiper and washer systems of motor vehicles.
[2] FMVSS Part 571, Standard No. 104: Windshield Wiping and Washing Systems.
[3] SAE J903. Passenger Car Windshield Wiper Systems.

Системы безопасности водителя и пассажиров

В случае ДТП системы пассивной безопасности предназначены для минимизации ускорений и сил, воздействующих на пассажиров и смягчения последствий ДТП. В этом контексте жизненно важный вклад вносят следующие системы защиты пассажиров (рис. 1):

- ремни безопасности с натяжными устройствами и ограничителями усилия ремней;
- различные подушки безопасности;
- системы защиты при опрокидывании автомобиля.

Ремни безопасности с натяжными устройствами обеспечивают большую часть защитного эффекта, поглощая 50–60% кинетической энергии пассажиров. Фронтальные подушки безопасности поглощают около 70% энергии, если правильно синхронизировано время их срабатывания.

Для достижения оптимальной защиты реакция всех компонентов системы защиты пассажиров должна быть согласована. Это становится возможным благодаря соответствующим датчикам и высокоскоростной обработке сигналов. Алгоритмы управления натяжными устройствами, подушками безопасности и системами защиты при опрокидывании автомобиля хранятся в комбинированном ЭБУ.

Ремни безопасности и натяжные устройства ремней безопасности

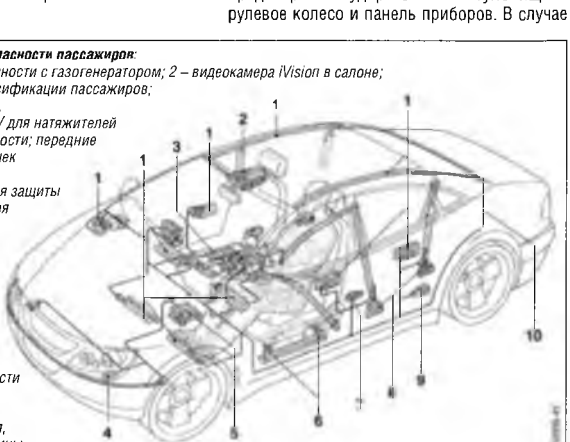
Функция

Ремни безопасности служат для ограничения перемещений водителя или пассажира, когда автомобиль наезжает на препятствие. Таким образом, пассажиры уже на ранней стадии вовлекаются в замедление автомобиля при ударе (рис. 2). Стандартное оборудование представляет собой трехточечный ремень безопасности с инерционной катушкой, которая все чаще используется на среднем сиденье заднего ряда. У регулируемых систем пряжка ремня прикреплена прямо к сиденью, а инерционная катушка – к средней или задней стойке (рис. 1).

Неплотно натянутый ремень (например, когда надет толстый пуховик) при ударе не позволит пассажиру быть вовлеченным в замедление автомобиля на ранней стадии. Сначала пассажир продолжает движение без удержания, что уменьшает защитный эффект ремня. Кроме того, ослаблению натяжения ремня способствует эффект замедления инерционной катушки (эффект «ленточнокатушечный») и растяжение ремня.

Из-за ослабления натяжения трехточечные ремни безопасности обеспечивают ограниченную защиту в случае лобового столкновения на скорости более 40 км/ч с твердыми препятствиями, так как не могут безопасно предотвратить удар головы и туловища о рулевое колесо и панель приборов. В случае

Рис. 1. Системы безопасности пассажиров:
1 – подушка безопасности с газогенератором; 2 – видеокамера iVision в салоне; 3 – коврик для классификации пассажиров; 4 – передний датчик, 5 – центральный ЭБУ для натяжителей ремней безопасности; передние и боковых подушек безопасности и оборудования для защиты от опрокидывания со встроенным датчиком опрокидывания; 6 – датчик усилияiBolt, 7 – периферийный датчик давления; 8 – натяжное устройство ремня безопасности с пиропатроном; 9 – периферийный датчик ускорения, 10 – расположение шины



возникновения лобового столкновения натяжное устройство более плотно прижимает ремень безопасности к телу водителя (пассажира) и таким образом удерживает верхнюю часть туловища в положении, располагаемом как можно ближе к спинке сиденья. Это предотвращает чрезмерное смещение водителя (пассажира) вперед, вызываемое инерцией масс. Натяжные устройства ремней безопасности улучшают ограничивающие характеристики трехточечного инерционного ремня безопасности и увеличивают степень защиты от возможного ранения.

Предварительное условие оптимальной защиты состоит в том, чтобы первое движение водителя (пассажира) оставалось минимальным, поскольку они замедляют свое движение одновременно с автомобилем. Активация натяжных устройств ремней безопасности решает эту проблему практически с момента удара и обеспечивает удержание пассажиров на максимально ранней стадии. Максимальное движение вперед с предварительно натянутыми ремнями безопасности составляет около 2 см; механическое преднатяжение длится 5–10 мс.

Натяжные устройства ремней безопасности активируются, в частности, при лобовых ударах, но это все чаще происходит и при боковых ударах. Это нужно для того, чтобы в случае ДТП с боковым ударом пассажиры были лучше защищены более плотно натянутыми ремнями.

Конструкция и принцип действия

Натяжитель диагональной ветви трехточечного ремня

Во время столкновения натяжитель диагональной ветви трехточечного ремня компенсирует ослабление ремня и замедленное действие натяжного устройства путем втягивания и натяжения ленты ремня. Это инициирует защитный эффект ремня на ранней стадии. При скорости наезда 50 км/ч эта система достигает максимального эффекта в течение первых 20 мс столкновения и таким образом поддерживает защитный эффект подушки безопасности, для которой требуется около 40 мс до ее полного надувания.

При активации система электрически зажигает пиропатрон (рис. 3). Давление взрывающегося газа воздействует на поршень, соединенный со стальным тросом, который вращает катушку ремня, так чтобы он плотно прилегал к телу водителя (пассажира). Поэтому ремень натягивается уже до того, как водитель (пассажир) начнет смещаться вперед. Эти натяжители позволяют втянуть ремень за 10 мс на 12 см.

Активация натяжителя запускается датчиками ускорения, встроенными в ЭБУ. Кроме того, в передней части автомобиля устанавливаются датчики, обеспечивающие быстрое

Рис. 2. Замедление автомобиля до полной остановки и смещение вперед водителя (пассажира) при столкновении с препятствием со скорости 50 км/ч:
① – столкновение; ② – зажигание пиропатрона натяжного устройства и подушки безопасности; ③ – ремень натянут; ④ – подушка наполнена; – – – без системы пассивной безопасности, —— с системой пассивной безопасности

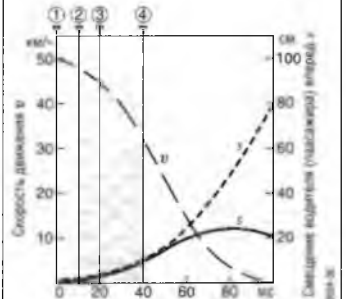
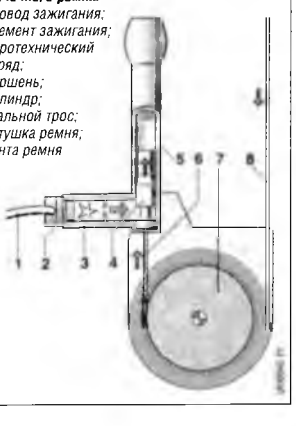


Рис. 3. Натяжитель диагональной ветви трехточечного ремня:
1 – провод зажигания;
2 – элемент зажигания;
3 – пиротехнический заряд;
4 – поршень;
5 – цилиндр;
6 – стальной трос;
7 – катушка ремня;
8 – лента ремня



и безопасное обнаружение экстренных ситуаций. В основном используются микромеханические датчики ускорения. Аналитические алгоритмы в ЭБУ непрерывно считывают данные датчиков и определяют, имеет ли место ДТП.

Поскольку воспламенение пиропатрона – процесс необратимый, решение о воспламенении должно приниматься взвешенно; должно делаться различие с такими ситуациями, как, например, наезд на бордюр, когда срабатывания быть не должно. Сигналы должны обрабатываться как можно быстрее, чтобы натяжитель ремня срабатывал вовремя после наезда на препятствие.

Натяжитель пряжечного типа

При срабатывании от воспламенения пиропатрона или пружинных систем этот натяжитель оттягивает пряжку ремня и одновременно подтягивает диагональный и поясной ремни. Натяжитель пряжечного типа повышает защиту от выскальзывания из-под поясного ремня безопасности («эффекта подныривания»).

Натяжение происходит за то же время, что и у натяжителей диагональных ремней.

Сочетание двух натяжителей

Сочетание двух натяжителей – диагонального ремня и пряжечного типа – для одного ремня обеспечивает большую длину натяжения, позволяя добиться большего удерживающего эффекта. Натяжитель пряжечного типа активируется либо при достижении определенного уровня серьезности ДТП, либо в ответ на определенную задержку после срабатывания натяжителя диагонального ремня.

Ограничитель усилия ремня

В этом случае натяжные устройства ремней сначала натягивают их полностью (например, с максимальным усилием около 4 кН) и удерживают пассажиров. При превышении определенного натяжения ремня он ослабляется и позволяет пассажиру сместиться вперед в большей степени. Кинетическая энергия пассажира преобразуется деформационными элементами в энергию деформации. Примеры деформационных элементов, используемых в этой ситуации являются торсион в валу инерционной катушки и шов в ремне для управления срабатыванием.

Другим вариантом является электронно-управляемый одноступенчатый ограничитель усилия, уменьшающий натяжение ремня до 1–2 кН путем зажигания детонатора (например, благодаря специальным швам в ремне) через определенное время после выпуска второй ступени передних подушек безопасности (т.е. при полностью надутых подушках) и после определенного смещения вперед.

Ограничитель усилия натяжения ремня предотвращает возникновение пиков ускорения и, соответственно, предотвращает риск перелома ключиц и ребер при получении внутренних травм.

Рис. 4. Системы защиты водителя и пассажиров с натяжным устройством ремня и фронтальными подушками безопасности:

1 – инерционная катушка с натяжным устройством ремня безопасности;
2 – подушка безопасности переднего пассажира;
3 – подушка безопасности водителя;
4 – ЭБУ



Подушка безопасности

Передняя подушка безопасности

Функции

Задача передних подушек безопасности – защита водителя и переднего пассажира от травм головы и верхней части тела в случае наезда на препятствие (т.е. лобового удара) (рис. 4). При серьезном ДТП ремень безопасности с натяжным устройством не может предотвратить удар головой о рулевое колесо или панель приборов. Для выполнения задачи исключения такого удара подушки безопасности имеют разные объемы и формы, адаптированные к параметрам автомобиля в зависимости от точки установки, типа автомобиля и свойств структурной деформации (при ДТП автомобили деформируются разными путями). Пассажирам обеспечивается наиболее эффективная защита, если системы ремней безопасности и передних подушек безопасности работают с оптимальной координацией.

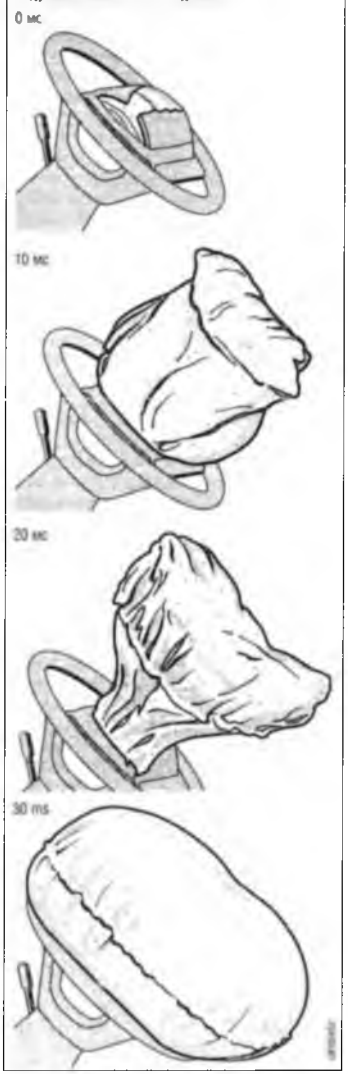
Принципы работы

При обнаружении датчиками ускорения столкновения автомобиля с препятствием пиротехнические газогенераторы надувают подушки безопасности водителя и переднего пассажира (рис. 5). Для достижения максимальной защиты подушка безопасности должна быть полностью надута до того, как водитель (пассажир) коснется нее. Когда водитель (пассажир) касается подушки, она частично сдувается через специальные клапаны. Энергия удара, воздействующего на водителя (пассажира), «мягко» поглощается при некритичных (в плане травмирования) поверхностном давлении и замедлении.

На скорость надувания и жесткость надутой подушки в случае с двухступенчатыми пиротехническими газогенераторами можно повлиять через задержку зажигания второй ступени.

Максимально допустимое смещение водителя вперед до надувания его подушки составляет 12,5 см. По времени это соответствует приблизительно 40 мс после начала столкновения (в случае с наездом на твердое препятствие на скорости 50 км/ч). Электронике требуется 10 мс на обнаружение столкновения и детонирование пиропатрона; на надувание подушки уходит 30 мс. Затем подушка сдувается через специальные клапаны в течение еще 80–100 мс. Таким образом, весь процесс занимает чуть больше одной десятой секунды.

Рис. 5. Динамическое наполнение подушки безопасности водителя



Определение столкновения

Один или несколько датчиков, измеряющих ускорение вдоль продольной оси автомобиля и большей частью встроенных в ЭБУ, фиксируют замедление при столкновении. На основе этого замедления вычисляются изменение скорости и движение пассажиров вперед. Чтобы можно было лучше обнаруживать столкновение по касательной и смещенные столкновения, алгоритм срабатывания может также учитывать сигналы датчика бокового ускорения.

Помимо обнаружения столкновения необходима также его оценка. Подушка безопасности не должна срабатывать от удара молотком при ремонте автомобиля в мастерской, легкие толчки и удары по кузову, движение через бордюры или выбоины на проезжей части. Чтобы этого не случилось, посредством алгоритмов цифрового анализа производится обработка сигналов датчиков ускорения, чья чувствительность предварительно оптимизировалась моделированием различных ударных воздействий.

Каждое транспортное средство обладает своими характеристиками ускорения, которые зависят, в частности, от оборудования автомобиля и деформационных характеристик кузова. С помощью характеристик ускорения определяются установочные параметры, необходимые для определения чувствительности в алгоритме анализа и, в конечном итоге, для срабатывания надувной подушки безопасности и натяжителей ремней безопасности.

Еще как минимум один датчик ускорения размещается в ЭБУ для предотвращения некорректного срабатывания подушки в случае неисправности основного датчика ускорения. Для надувания подушки при ДТП у этого датчика также должен быть превышен заданный порог срабатывания.

Первый порог срабатывания у натяжного устройства достигается в течение 8–30 мс в зависимости от типа или серьезности удара, а первый порог срабатывания фронтальной подушки безопасности – через 10–50 мс.

Адаптированное надувание подушек безопасности

Во избежание травмирования подушками безопасности водителя и пассажиров, находящихся в нестандартном положении (например, наклонившихся слишком далеко вперед) или детей в детских креслах (обращенных назад) срабатывание и надувание фронтальных подушек должны быть адаптированы к ситуации. Здесь существуют следующие меры:

- кнопка отключения – для деактивации пассажирской подушки безопасности можно использовать кнопку отключения;
- все шире становится выбор стандартизированных систем крепления (детские кресла ISOFIX). В замки устройств крепления сидений должны быть встроены автоматические выключатели действия надувной подушки безопасности для пассажира, что будет отображаться лампой на панели приборов.

Подушки безопасности с уменьшенным поглощением энергии

В США предпринимаются попытки уменьшить активное усилие надувания путем внедрения подушек безопасности, у которых мощность пиротехнического газогенератора уменьшена на 20...30%, что уменьшает скорость нагнетания, тяжесть последствий наполнения и риск получения травм. Крупным и тяжелым водителю и пассажирам легче продавить такие подушки, т.е. они отличаются пониженным поглощением энергии.

В США в настоящее время предпочтительным является метод срабатывания «с малым риском». Это означает, что в ситуациях с «нестандартным» положением водителя (пассажира) у фронтальных подушек срабатывает только первая ступень. При тяжелых ударах может достигаться полная мощность газогенератора – за счет срабатывания обеих ступеней.

Еще один способ реализации срабатывания подушек с «малым риском» при одноступенчатом газогенераторе – оставлять выпускные клапаны полностью открытыми.

Интеллектуальные системы подушек безопасности

Для постепенного снижения риска травмирования применяются интеллектуальные системы надувных подушек безопасности с улучшенными функциями и вариантами управления процессом наполнения подушки. К функциональным улучшениям относятся:

- выявление степени серьезности удара путем оптимизации алгоритма срабатывания или использования одного или двух передних датчиков. Передние датчики – это датчики ускорения, устанавливаемые в зоне смятия (например, на поперечине радиатора), помогающие заблаговременно распознать различные типы ударов, такие как ODB (удар со смещением о деформируемое препятствие), удар о столб или

въезд под фуру. Они также позволяют оценить энергию удара. В менее серьезных ДТП, где достаточно защитного эффекта, обеспечиваемого натяжным устройством ремня безопасности, срабатывание подушки не обязательно (снижение затрат на ремонт);
- определение использования ремней безопасности;
- определение занятости сиденья, положения и веса пассажира;
- использование натяжных устройств ремней безопасности с различными лимитируемыми усилиями натяжения в зависимости от массы водителя (пассажира);
- определение положения сиденья и наклона спинки;
- использование фронтальных надувных подушек безопасности с многоступенчатым циклом газогенератора или с одноступенчатым газогенератором и пиротехнически активированным газогенераторным клапаном; скорость надувания и жесткость подушек безопасности можно адаптировать к серьезности и характеру ДТП посредством нескольких порогов срабатывания;
- обмен данными с другими системами, например ESP (системой динамической стабилизации), датчики которых позволяют использовать информацию в течение фазы, непосредственно предшествующей столкновению, для оптимизации срабатывания удерживающих систем. Например, используя данные ESP, в некоторых ДТП с опрокидыванием можно активировать боковую подушку безопасности раньше.

Подушка безопасности для защиты коленей

На некоторых типах автомобилей передние подушки безопасности устанавливаются вместе с подушками для защиты коленей. Они обеспечивают вращательное движение вперед верхней части тела и головы, необходимое для оптимальной защиты подушкой безопасности. Кроме того, подушка для защиты коленей предотвращает контакт с консолью панели приборов и снижает риск травмирования в этой области.

Боковая подушка безопасности

Функции

Боковые подушки безопасности, надуваемые вдоль потолочной обшивки для защиты головы (например, оконные подушки, надуваемые занавески) или для защиты верхней части туловища от двери или спинок сидений (подушки защиты грудной клетки). Подушки плавно смягчают удары и таким образом защищают водителя и пассажиров от травм при боковом столкновении.

Принцип работы

Из-за недостатка зоны сжатия и минимального расстояния между водителем и пассажирами и кузовом автомобиля, обеспечить своевременное наполнение боковых надувных подушек безопасности не просто. Поэтому в случае серьезных столкновений время на определение удара и активацию боковой подушки должно составлять 5–10 мс. Надувание подушек защиты грудной клетки объемом 12 л может длиться не дольше 10 мс.

Эти требования могут быть выполнены путем оценки сигналов датчиков периферийного, поперечного ускорения и давления. Эти датчики устанавливаются в соответствующих точках на кузове, например, средней стойке или двери.

Датчики PAS передают данные ускорения на центральный ЭБУ через цифровой интерфейс. Центральный ЭБУ приводит в действие боковые надувные подушки безопасности при условии, если датчик поперечного ускорения подтверждает боковое столкновение посредством контроля достоверности данных.

Изменения давления, вызванные деформацией двери (давление воздуха в дверной полости) могут также измеряться датчиком периферийного давления (PPS). Это приведет к быстрому обнаружению ударов в двери. Подтверждение правдоподобия теперь выполняется датчиками ускорения, устанавливаемыми на опорных периферийных структурных компонентах. Эта система неоспоримо быстрее центральных датчиков поперечного ускорения.

Системы защиты при опрокидывании автомобиля

Функция

При возникновении аварии, связанной с опрокидыванием транспортного средства, автомобили с открытым верхом, такие как кабриолеты, открытые внедорожные автомобили и т.п., становятся уязвимы с точки зрения отсутствия защитной структуры крыши, как это имеет место у автомобилей с закрытым верхом. Поэтому первоначально специальные системы аварийной индикации и защиты при опрокидывании автомобиля устанавливались исключительно на легковых автомобилях с откидным верхом и родстерах, не имеющих фиксированных защитных брусьев.

Сегодня системы предупреждения об опрокидывании используются и в легковых автомобилях с закрытым верхом. При опрокидывании автомобиля существует опасность выпадания непристегнутых пассажиров через боковые окна или высовывания через окна частей тела пристегнутых пассажиров (например, рук) и их серьезного травмирования. Для обеспечения защиты в таких случаях активируются уже существующие удерживающие системы, такие как натяжные устройства ремней безопасности и боковые и передние подушки безопасности. В кабриолетах выдвигаются защитные брусья или верхние ограничители.

Принцип действия

Современные системы датчиков вызывают срабатывание системы безопасности при превышении порога, соответствующего ситуации, и лишь в случае наиболее часто происходящего типа опрокидывания (вокруг продольной оси). Концепция определения момента опрокидывания фирмы Bosch предполагает использование поверхностно-микромеханического датчика поворота вокруг вертикальной оси (рыскания) и датчиков ускорения с высокой разрешающей способностью в поперечном и вертикальном направлениях движения автомобиля (оси y и z). Датчик рыскания является главным, а датчики ускорения по осям y и z используются для проверки правдоподобия и определения типа опрокидывания (наезд на насыпь, бордюр и т.п.). В системах Bosch эти датчики включены в устройство срабатывания подушек безопасности.

Срабатывание систем защиты пассажиров адаптируется к ситуации согласно типу опрокидывания, скорости вращения вокруг вертикальной оси и боковому ускорению, т.е. системы срабатывают через 30–3000 мс путем автоматического выбора и использования алгоритма, соответствующего типу опрокидывания.

Компоненты

Электронный блок управления (ЭБУ)

Оптимальная защита водителя (переднего пассажира) при лобовом, смещенном под некоторым углом столкновении или наезде на мачту уличного освещения достигается посредством точно скоординированной взаимосвязи между передними надувными подушками безопасности с пиротехническим электровоспламенением и натяжными устройствами ремней безопасности. Для того чтобы оптимизировать эффект обоих защитных устройств, они должны приводиться в действие с максимальной чувствительностью ко времени срабатывания, обеспечиваемой общим электронным блоком управления (ЭБУ) подушками безопасности, установленным в салоне. В него интегрированы также функции управления боковыми подушками и защиты при опрокидывании. В центральный ЭБУ в настоящее время интегрированы следующие функции:

- определение столкновения датчиком ускорения и предохранительным выключателем (механическим выключателем ускорения у более старых ЭБУ) или двумя датчиками ускорения без предохранительного выключателя (резервированное, полностью электронное считывание);
- быстрое приведение в действие передних подушек безопасности и натяжных устройств ремней безопасности в ответ на различные виды столкновений в продольном направлении (например, лобовое, под некоторым углом, смещенное, наезд на столб, наезд сзади);
- определение опрокидывания датчиками скорости вращения вокруг вертикальной оси и ускорения по осям y и z (боковое ускорение и ускорение в направлении вертикальной оси) в нижнем диапазоне g (до приблизительно 5 g);
- активация оборудования для защиты при опрокидывании;
- для активации боковых подушек ЭБУ работает в увязке с центральным датчиком поперечного ускорения, двумя или четырьмя периферийными датчиками ускорения и периферийным датчиком давления (PPS), установленным в каждой дверной полости;
- преобразователь напряжения и аккумулятор энергии в случае подачи питания от аккумуляторной батареи должны отключаться;

- селективное срабатывание натяжителей ремней безопасности в зависимости от состояния пряжек ремней: подушка безопасности срабатывает только при застегнутой пряжке ремня (определение через выключатель в пряжке);
- установка множественных пороговых значений приведения в действие натяжных устройств ремней безопасности и передних надувных подушек безопасности с двумя стадиями действия в зависимости от количества пристегнутых ремней;
- считывание сигналов классификации водителя и пассажиров (датчик усилия iBolt) и соответствующее срабатывание удерживающих систем;
- чтобы выполнить экстренный вызов после удара и активировать вторичные системы безопасности (сигнальные огни, отпирание центрального замка, отключение топливного насоса, отсоединение аккумуляторной батареей и т.д.), ЭБУ системы подушек безопасности отправляет сигнал об обнаруженном ударе, например, по шине CAN.

Газогенераторы

Конструкция

Пиропатроны газогенераторов для подушек безопасности и натяжных устройств активируются за счет электрического зажигания. Газогенератор надувает подушку безопасности газом.

Пиропатрон (рис. 6) имеет резервуар с зарядом и запалом. Пиропатрон соединяется с ЭБУ подушки через контактные выводы штырьки и двухпроводной контур. Чтобы сработала подушка безопасности, ЭБУ с помощью двух зажигательных каскадов генерирует электрический ток, который протекает через запал внутри пиропатрона. Провод раскаляется и активирует заряд.

Подушка безопасности водителя, встроенная в ступицу рулевого колеса (объем около 60 *л*) и подушка безопасности пассажира, встроенная в пространство перчаточного ящика (примерно 120 *л*) надуваются примерно через 30 мс после детонации.

Датчики в салоне

Классификация пассажиров

Для классификации пассажиров используется метод измерения абсолютного веса, iBolt («интеллектуальный болт»). Болты iBolt (рис. 1), измеряющие возникающие силы, крепят раму сиденья к передвижному основанию (подвешенное сиденье), заменяя обычно устанавливаемые четыре монтажных болта. Они измеряют зависящее от веса изменение зазора между втулкой и внутренним болтом со встроенной интегральной схемой с датчиками Холла, подключенной к передвижному основанию.

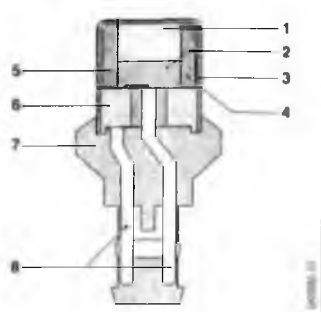
Определение нестандартного положения

Для определения нестандартного положения могут использоваться следующие оптические методы:

- принцип «Время полета» (TOF) – система передает импульсы инфракрасного света и измеряет время их отражения в зависимости от расстояния до пассажиров. Измеряемые промежутки времени имеют порядок пикосекунд;
- метод «Фотонного микшера» (PMD) – датчик формирования изображения передает световые импульсы и обеспечивает пространственное видение и триангуляцию;
- стереовидеокамера «iVision» в салоне на базе технологии CMOS – определяет положение пассажира, размер и способ удержания и также может управлять функциями комфорта (настройками сидений, зеркал и радио) для отдельных пассажиров.

Единого стандарта для системы датчиков в салоне еще не создано. Могут также использоваться коврики для классификации пассажиров в сочетании с ультразвуковыми датчиками.

Рис. 6. Пиропатрон:
1 – заряд; 2 – детонатор; 3 – колпачок; 4 – держатель заряда; 5 – запал; 6 – зажигательная головка. 7 – корпус, 8 – контактные выводы



Перспективные разработки

В области защиты пассажиров разрабатываются следующие дополнительные новшества.

Подушки безопасности с системой активной вентиляции
Эти подушки имеют управляемый клапан для выпускания газа и поддержания внутреннего давления в подушке постоянным даже если в нее уткнется пассажир, чтобы свести к минимуму травмы. Упрощенная версия – подушка с «интеллектуальными выпускными клапанами». Эти выпускные клапаны остаются закрытыми (чтобы подушка не сдувалась) вплоть до роста давления из-за удара пассажира о подушку, после которого они открываются, позволяя подушке сдуться. В результате способность подушки поглощать энергию полностью сохраняется до момента, когда включается ее амортизирующая функция.

Объединение функций пассивной и активной безопасности
Примерами синергизма в использовании датчиков различных систем безопасности (в данном случае системы динамической стабилизации, ESP) являются такие функции, как расширенное определение опрокидывания, раннее распознавание наезда на столб и смягчение вторичного столкновения.

Расширенное определение опрокидывания
Расширенное определение опрокидывания использует сигналы ESP, передаваемые по шине CAN для улучшения распознавания ситуаций с опрокидыванием на грунт. Эти данные используются ЭБУ подушек безопасности для вычисления вектора скорости и боковой скорости. На их основе определяются отклонение вектора движения автомобиля от его продольной оси и, соответственно, поперечное перемещение автомобиля.

ESP может использовать сигналы датчиков ускорения в диапазоне малых значений g (оси y и z) для улучшения определения нестабильных по динамике ситуаций.

Раннее распознавание наезда на столб
Раннее распознавание наезда на столб также использует сигналы ESP для улучшения распознавания бокового удара о столб. Система берет за основу тот факт, что в случае бокового удара о столб автомобиль перед ударом заносит, и занос определяется датчиками ESP. Затем информация о поперечном перемещении автомобиля используется в алгоритме срабатывания для ускорения срабатывания боковых подушек безопасности.

Смягчение вторичного столкновения
При ДТП за первоначальным столкновением могут последовать другие – например, в результате потери контроля над автомобилем. Этот феномен угрожает рисками и пассажирам автомобиля, и другим участникам движения. Функция смягчения вторичного столкновения обеспечивает помощь в случае таких ДТП. При столкновении ЭБУ подушек безопасности передает сигнал на ЭБУ системы ESP. Система ESP использует специально рассчитанные притормаживания для замедления автомобиля или – где это необходимо – выключения двигателя. Таким образом, можно избежать вторичных столкновений или снизить их опасность.

Путем объединения ЭБУ системы ESP и подушек безопасности можно использовать обнаружение нестабильных или критических ситуаций для принятия более конкретных мер по обеспечению безопасности. При обнаружении нестабильного состояния меры по обеспечению безопасности могут приниматься поэтапно; к ним можно отнести закрывание окон и сдвижной крышки люка и повторно используемая (реверсируемая) подтяжка ремней безопасности с электроприводом. В критической ситуации это уменьшает провисание ремня и неконтролируемое боковое перемещение пассажира, и позволяет боковой подушке обеспечить оптимальную защиту при последующем столкновении.

Имеется тенденция к созданию стандартизированной системы безопасности, в которой функции активной и пассивной безопасности будут скомбинированы в одном блоке.

Обнаружение опасности столкновения

Для дальнейшего совершенствования функции срабатывания подушек безопасности и раннего обнаружения опасности столкновения используются микроволновые радары, ультразвуковые датчики или лидары (лазерные локаторы инфракрасного диапазона) для определения относительной скорости, расстояния и угла удара при лобовом столкновении.

В этой связи внедряются реверсивные преднатяжители ремней безопасности с электромеханической активацией. Их реверсивность означает возможность подтяжки ремней еще до потенциального столкновения. Таким образом, провисания ремней можно избежать уже в начале удара, что позволяет водителю и пассажирам участвовать в замедлении автомобиля с самого начала.

Другие варианты подушек безопасности

Еще одно улучшение удерживающего эффекта будут обеспечивать подушки, встроенные в грудную часть ремня безопасности («воздушные ремни», «надувные трубчатые грудные ограничители» или «подушка в ремне»), уменьшающие риск перелома ребер.

В настоящее время разрабатываются надувные подголовники (адаптивные ограничители для предупреждения шейно-позвоночных травм), надувные напольные коврики (для предотвращения травмирования ног и лодыжек) и двухступенчатые натяжители ремней безопасности и «активные сиденья». В последнем случае в передней части сиденья надувается подушка, увеличивающая угол наклона и уменьшающая эффект подныривания (сползание пассажира вперед).

Системы замков

Функция

Система замков включает замки и защелки дверей, крышки багажника, капота двигателя, крышки наливной горловины топливного бака и перчаточного ящика и соответствующие электронные блоки управления. Электронная часть системы замков включает систему дистанционного радиоуправления или систему отпирания дверей автомобиля без ключа с использованием приемопередающих устройств. В сегменте автомобилей представительского класса система дополняется электроприводом автоматического открытия/закрытия бесступенчатой фиксации положения боковой двери.

Система замков должна выполнять следующие типичные функции:

- контроль доступа, противоугонная сигнализация и защита водителя и пассажиров от посягательств третьих лиц;
- приведение в действие ручек открытия дверей с повышенным комфортом (в отношении акустики и осязательных ощущений);
- подъем, торможение и запирание двери автомобиля во время операции закрытия;
- иммобилизация дверей во время движения (решение проблем скрипа).

Большое разнообразие ситуаций, возникающих в ходе повседневной эксплуатации автомобиля, вызывает необходимость наличии сложной системы логических функций. На случай аварийных ситуаций все электронные логические цепи должны полностью дублироваться механическими элементами. Соответственно, система должна включать большое количество прецизионных механических узлов.

Кроме вышеуказанных функций компоненты боковой двери являются частью пассивной системы защиты водителя и пассажиров, поскольку в случае столкновения большая часть структурных усилий, воздействующих на дверь, рассеивается в кузове автомобиля дверным замком и держателем замка. Экстремальные ускорения, возникающие в ходе этих процессов, не должны выводить из строя механизм замка или изменять логическое состояние цепи. Например, замок предотвращающий открывание двери детьми, должен оставаться запертым даже после столкновения. Для достижения этого для предотвращения самопроизвольного срабатывания механические узлы точно сбалансированы или снабжены сильными пружинами.

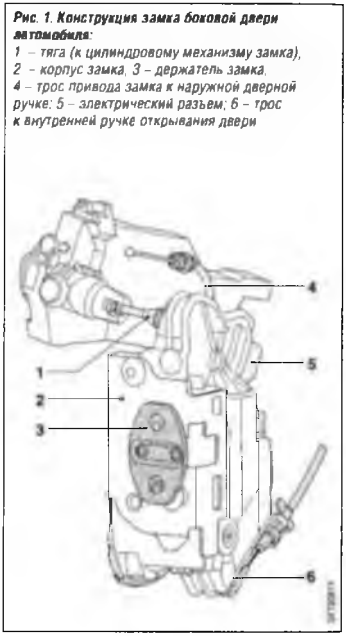


Рис. 1. Конструкция замка боковой двери автомобиля:
1 – тяга (к цилиндровому механизму замка), 2 – корпус замка, 3 – держатель замка, 4 – трос привода замка к наружной дверной ручке; 5 – электрический разъем; 6 – трос к внутренней ручке открывания двери

В ходе повседневной эксплуатации автомобиля система замков в сочетании с уплотнениями дверей играет важную роль в создании впечатления автомобиля высшего класса. Приятный звук и осязательные ощущения при закрывании дверей – это то, к чему сегодня стремятся конструкторы.

Конструкция (на примере боковой двери)

Центральным компонентом системы является электромеханический дверной замок. Механический интерфейс замка включает держатель замка, внутренний и наружный приводы и тросы или соединительные рычажные механизмы (см. рис. 1). Замок активируется электрически при помощи блока управления дверями.

Основными функциями дверного замка являются закрывание, запирание, двойное запирание и открывание двери. В соответствии с этими функциями дверной замок включает следующие узлы: запорный механизм, рычажный механизм и систему двойного запирания.

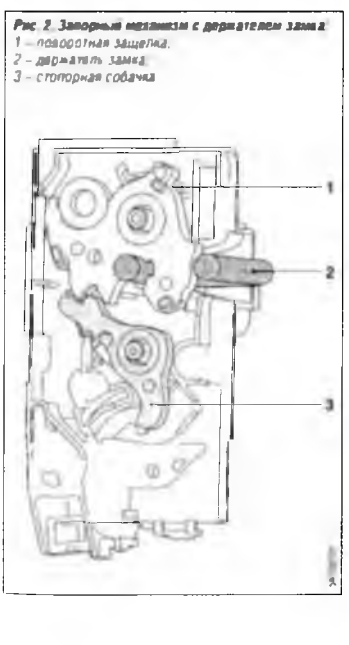


Рис. 2. Запорный механизм с держателем замка:
1 – поворотная защелка;
2 – держатель замка;
3 – стопорная собачка

Функция закрытия

В запорном механизме поворотная защелка, стопорная собачка и корпус замка совместно воздействуют на рабочий рычаг ударной пластины замка (см. рис. 2). Когда дверь закрывается, держатель замка входит в поворотную защелку. За счет поворота защелки дверь устанавливается в надлежащее конечное положение по вертикали (функция центровки). Это подъемное действие поворотной защелки имеет большую важность для иммобилизации двери во время движения автомобиля. В противоположном направлении на держатель замка воздействует подпружиненный корпус замка (ловитель). Во время движения по неровной дороге относительное перемещение замка и фиксатора может вызывать раздражающий скрип.

Во время закрывания дверь тормозится в горизонтальном направлении. При этом высокая кинетическая энергия, при типичной скорости 1,2 м/с) рассеивается на протяжении нескольких миллиметров перемещения фиксатора замка. Для достижения требуемого звука при закрывании двери система уплотнений двери и запорный механизм должны быть очень точно согласованы друг с другом. При этом свою эффективность продемонстрировали геометрические формы контактных поверхностей, сводящие к минимуму импульсные ударные воздействия. Геометрия контактных поверхностей оптимизирована таким образом, что кинетическая энергия может быть равномерно рассеяна на протяжении увеличенных расстояний вхождения компонентов в зацепление. Количество остаточной энергии уменьшается звукоизолирующими элементами.

Когда держатель замка оказывается полностью убранным, стопорная собачка входит в первую фиксирующую выемку поворотной защелки. Механизм теперь заперт. Структурные силы, действующие между дверью и кузовом, надежно передаются без разрушающих вибраций или относительных перемещений элементов.

Из соображений безопасности нормативные положения требуют наличия дополнительного предварительного фиксатора. Если система не достигает основного фиксатора (например, из-за недостаточной энергии закрытия или застрявшего в проеме ремня безопасности), дверь не открывается, а надежно удерживается в положении предварительной фиксации.

Функция открытия двери

Для открытия двери автомобиля требуется механическая работа, совершаемая наружной или внутренней ручкой, передаваемая промежуточным рычажным механизмом и в конечном итоге воздействующая на стопорную собачку. При этом необходимо преодолеть усилия сопротивления со стороны стопорной собачки и поворотной защелки. Следует учесть, что при открытии двери происходит резкое высвобождение энергии, запасенной в системе уплотнений двери. При этом усилия обычно могут достигать 300 Н (на автомобилях представительского класса 700 Н). Здесь также возможны безупречные с точки зрения акустики технические решения с использованием специальных фиксаторов, исключающие воздействие на стопорную собачку циклических нагрузок.

Для многих пользователей критериями качества являются гармоничная характеристика усилий и низкое требуемое максимальное усилие. На ощущение комфорта очень большое влияние оказывает передаточное отношение рычажного механизма стопорной собачки и поворотной защелки. В современных конструкциях это передаточное отношение составляет от 1:2 до 1:2,5 (см. рис. 3).

Рис. 3. Передаточное отношение рычажного механизма поворотной защелки:
l_{SPK} – *плечо рычага стопорной собачки,*
l_{SH} – *плечо рычага держателя замка,*
i – *передаточное отношение рычажного механизма*

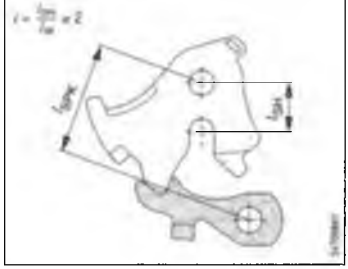


Рис. 5. Запорный механизм обычного типа:
1 – поворотная защелка,
2 – стопорная собачка

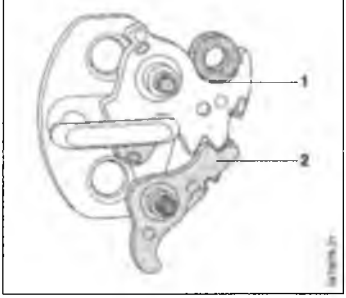
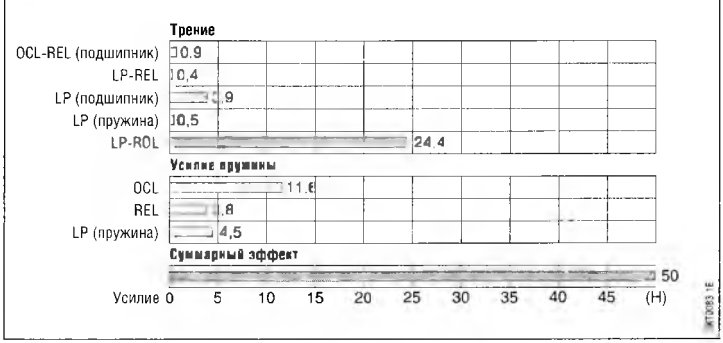


Рис. 4. Переменные, влияющие на усилие открытия:
OCL – наружный рычаг управления; REL – рычаг собачки; LP – стопорная собачка; ROL – поворотная защелка



На рис. 4 показано влияние соотношения плеч запорных элементов на усилие открытия. В то же время не следует игнорировать усилия возвратных пружин в рычажном механизме.

Перспективы

Запорный механизм с двумя стопорными собачками (функция i-comfort)

Обычный механизм со стопорной собачкой является самозапирающимся, что обеспечивает надежное запирание двери во время движения по неровной дороге или в случае столкновения. Запирание замка осуществляется всего лишь одной собачкой.

На смену этой конструкции вскоре может прийти запорный механизм с промежуточной стопорной собачкой. Эта конструкция обеспечит значительно более благоприятные передаточные отношения рычажного механизма (направление усилий) поворотной защелки. При этом требуемое для открывания двери усилие значительно снижается.

Что еще важнее, применение промежуточной стопорной собачки позволит сгладить зависимость усилия от величины перемещения рычажного механизма отпирания замка (см. рис. 6).

Рис. 6. Зависимость усилия открывания от величины перемещения освобождающего элемента:
1 – обычный запорный механизм;
2 – запорный механизм с двумя стопорными собачками;
A – включение в работу наружного рычага управления;
B – включение в работу освобождающего рычага;
C – преднатяжение стопорной собачки;
D – перемещение стопорной собачки;
E – открывание поворотной защелки;
F – стопорная собачка освобождена



Функции двойного запирания

Двойное запирание означает, что при определенных условиях механизм отпирания замка снаружи может быть деактивирован. Поскольку система запирания дверей должна продолжать надежно функционировать в случае аварийного отключения электропитания, вся система двойного запирания должна быть механически избыточна. В каждом случае состояние системы двойного запирания запоминается механически. Здесь хорошо зарекомендовали себя соединительные механизмы с принудительной блокировкой, включающие двухпозиционную пружину и запорный рычаг. Приведение механизма в действие обычно осуществляется электрически (в целях повышения уровня комфорта). Механическое открытие используется только в чрезвычайных ситуациях, затем, пока дверь открыта, может быть произведено двойное запирание с использованием гнезда в декоративной панели; отпирание производится принудительно каждый раз, когда пассажир, выходя из автомобиля, приводит в действие внутреннюю дверную ручку. Только на водительской двери имеется скрытый цилиндрический механизм замка, дающий возможность доступа в автомобиль снаружи при помощи ключа.

Из соображений экономии и в целях исключения излишних механических соединений внутри двери классическая запорная кнопка в дверной обшивке исключена. В будущем состояние системы двойного запирания будет индицироваться светодиодным индикатором.

Дополнительные функции

Защита от угона

В дополнение к функции двойного запирания деактивируются внутренние ручки открывания дверей и запорные кнопки. Теперь автомобиль можно отпереть только при помощи пульта дистанционного управления или механического ключа.

Блокируемый замок

Деактивируется только цепь отпирания замка изнутри. Тем не менее, пассажиры имеют возможность изменить состояние системы двойного запирания (аварийные сценарии). Деактивирована только функция открывания двери изнутри.

Электрическая система открывания двери

Замок в механизме фиксатора деактивируется электродвигателем (привода стопорной собачки).

Блокировка
Во избежание запирания человека внутри автомобиля механизм двойного запирания во время открывания двери блокируется изнутри.

Защита от запирания
Когда поворотная защелка открыта, функция двойного запирания водительской двери невозможна.

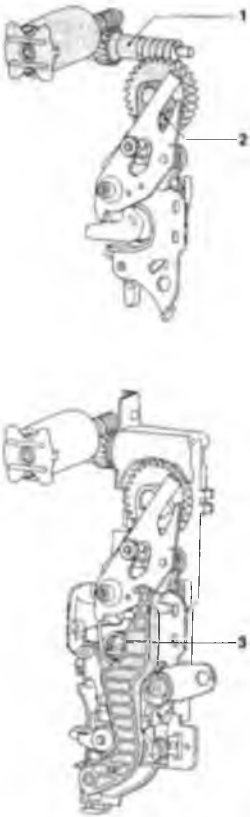
Двойное приведение в действие
При выходе пассажиров из автомобиля требуется двойное приведение в действие механизма замка задней двери (требование для США).

Силовая доводка дверей (функция i-close)
Эта функция была первоначально предусмотрена для автомобилей представительского класса, на которых она была предназначена для преодоления высоких противодавлений со стороны дверных уплотнений. По достижении предварительного фиксатора дверь притягивается в конечное положение электромеханическим устройством, преодолевающим возрастающее сопротивление уплотнений. Операция закрывания двери может быть механически прервана в любой момент времени (см. рис. 7).

Эта функция позволяет исключить раздражающий хлопающий звук при закрывании дверей. Пользователю более не требуется хлопать дверью, чтобы закрыть ее – достаточно легким усилием направить ее.

Еще одно преимущество этой системы заключается в том, что после силовой доводки двери автомобиля оказываются надежно закрытыми в основном фиксаторе во всех мыслимых ситуациях (пассажиры такси, дети, пассажиры с багажом в руках и т.д.)

Рис. 7. Система доводки двери (функция i-close):
1 – электродвигатель с редуктором;
2 – рычаг привода поворотной защелки;
3 – освобождающий рычаг



Акустика замков

Сегодня акустические свойства замков являются одним из главных показателей качества дверных замков. Для достижения «сочного» и в тоже время приятного, четко воспринимаемого звука при закрывании дверей могут быть приняты специальные конструктивные меры. Эти меры включают минимизацию моментов инерции компонентов и усилий пружин, снижение усилий реакции на изменение нагрузки, специальную геометрию контактных поверхностей, использование звукоизолирующих элементов и изоляцию резонирующих поверхностей (см. рис. 8). Объем исследовательских и опытно-конструкторских работ в этой области, проводимых производителями автомобилей, достаточно велик.

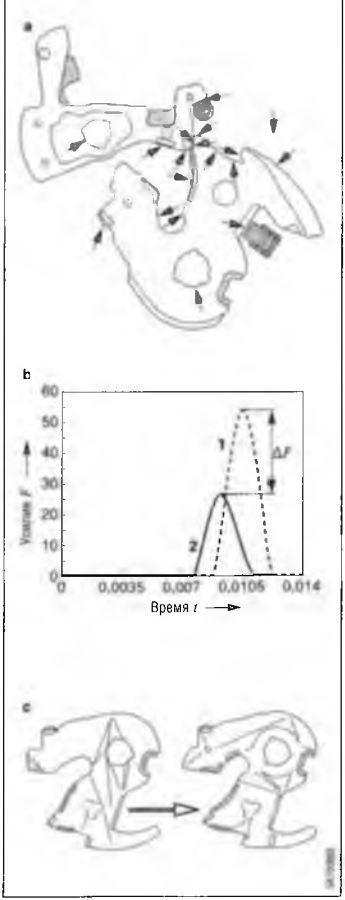
Согласование параметров трения поворотной защелки и фиксатора замка с жесткостью запорного механизма позволяет исключить раздражающие щелчки и скрипы Критические относительные смещения поворотной защелки и фиксатора замка сдвигаются в области, которые при нормальных условиях движения недостижимы.

Воздушный поток внутри двери

Воздушный поток, обтекающий автомобиль во время движения, создает перепад давления между салоном автомобиля и наружной обшивкой двери. Величина этого перепада давления может достигать 80 МПа. В результате внутри двери автомобиля возникает вторичный воздушный поток. Этот поток обычно содержит пыль, а его направление зависит от относительного положения линии уплотнения двери и входного отверстия дверного замка.

Конструкция дверного замка по определению не может быть абсолютно герметичной (вследствие наличия входного отверстия в фиксаторе замка). Отсюда вытекает необходимость в принятии специальных мер для отвода этого, содержащего пыль, потока от прецизионных механических узлов. На практике это сводится к установке специальных дефлекторов. Оптимизация потока осуществляется с использованием методов визуализации, измерения перепадов давления и т.д.

Рис. 8. Пример акустической оптимизации поворотной защелки:
a – потенциальные источники шума;
b – временная характеристика импульса закрытия двери; c – модификация поворотной защелки;
1 – первоначальный контур поворотной защелки;
2 – оптимизированный контур поворотной защелки



Электрическая система запирания дверей

Ввиду имеющейся сегодня тенденции к переходу на электромобили снова приобретают важность электрические замки. Замок этого типа состоит только из запорного механизма и его привода. Дверные ручки и иные элементы управления снабжены датчиками. Роль механических соединительных элементов выполняют электрические провода.

Электрическая система запирания дверей обладает рядом значительных преимуществ: меньшие размеры и вес замков, один единственный вариант замка на автомобиле и т.д.

При этом более не требуется перемещения дверных ручек, или в конечном счете, от них можно полностью отказаться.

Анализ частоты отказов демонстрирует, что система электрических замков имеет, как минимум, не меньшую надежность, чем обычные системы. Важным аспектом является надежное электропитание, т.е. наличие отдельного аккумулятора для системы электрических замков в то время как основная аккумуляторная автомобиля используется только в чрезвычайных ситуациях.

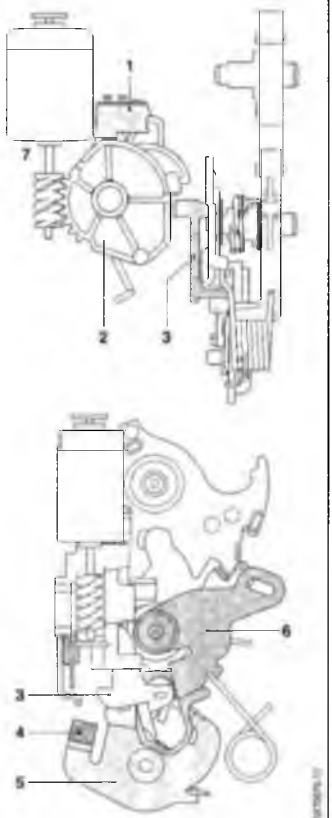
Системы привода дверей (i-move)

Дальнейшим развитием систем обеспечения комфорта станут автоматические приводы дверей (системы i-move). Они значительно облегчат пользователю вход и выход из автомобиля.

Эти технические решения основаны на электроприводе. Сначала дверь движется по команде оператора до предварительного фиксатора. По достижении этой точки сигнал предварительного фиксатора активирует систему доводки двери (функция i-close).

В целях обеспечения плавной работы и удобства для пользователя (например, на тесных парковках) ограничитель открывания двери будет плавно регулируемым. В настоящее время разрабатываются гидродинамические и вязкостно-механические технические решения.

Рис. 9. Система центральной блокировки дверей:
1 – микровыключатель;
2 – запорный рычаг;
3 – соединительный рычаг;
4 – стопорная собачка;
5 – рычаг освобождения.
6 – наружный рычаг управления;
7 – электродвигатель с червячной передачей



Технологии

Компоненты замков изготавливаются из стали (методом прецизионной штамповки). В целях предотвращения коррозии и снижения трения и износа требуются сложные методы термообработки и обработки поверхностей (такие как чистовая обработка, закалка и отпуск, нанесение покрытий).

В целях обеспечения эффективной шумоизоляции и уменьшения шума при закрывании двери поворотная защелка и стопорная собачка замка заключаются в пластиковую оболочку. Высококачественные дверные замки, как правило, содержат элементы шумоизоляции, встроенные в рычажные механизмы и приводы.

Дорогостоящие гальванопокрытия уходят в прошлое. Теперь на корпусы замков методом окраски наносятся слоистые цинковые покрытия.

Металлические компоненты рычажных механизмов в значительной степени заменяются пластмассовыми деталями из армированного полибутиленового терефталата. Основными преимуществами являются отсутствие необходимости в обработке поверхностей, сокращение времени изготовления, снижение веса.

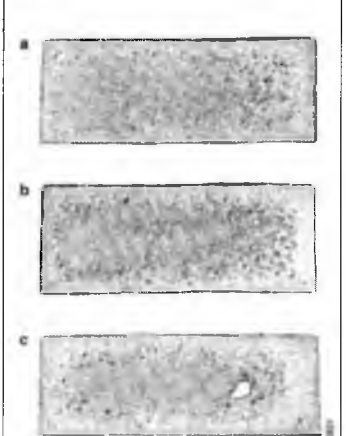
Крупные пластмассовые компоненты изготавливаются из микропористого пенопласта. Внутренние части имеют пористую структуру; близкие к поверхности зоны остаются незатронутыми (см. рис. 10). Что касается прочности на изгиб, которому в основном подвергаются компоненты, снижение прочности этой структуры с технологической точки зрения является пренебрежимо малым. Снижение на 10 % массы и на 35 % технического времени, затрачиваемого на единицу продукта, более чем оправдывают дополнительные затраты на разработку и мониторинг технологического процесса.

В прошлом замки дверей автомобиля представляли собой чисто механические устройства. Затем появились системы центрального запирания дверей (с использованием электрических и пневматических исполнительных устройств). В настоящее время эти исполнительные устройства полностью встроены в корпус замка. Пневматические устройства практически полностью вытеснены электрическими исполнительными механизмами. Команды системы санкционирования доступа выполняются миниатюрными электродвигателями, осуществляющими механические перемещения элементов замков. При помощи червячных передач вращательное движение вала высокоскоростного двигателя преобразуется в поступательное движение управляющего элементов замка (см. рис. 9). Основное преимущество червячной передачи заключается в высоком передаточном отношении (при небольшом занимаемом пространстве) и низком уровне шума.

Состояние замка определяется датчиками. В современных системах применяются датчики Холла и микровыключатели.

Сигналы датчиков передаются с дверных замков на блок управления системы обычными способами. В блоке управления системы центрального запирания дверей осуществляется цифровое преобразование сигналов с целью облегчения связи с замками других дверей и центральным блоком всей системы. В современных системах используется передача данных по шине LIN.

Рис. 10. Компоненты из микропористого пенопласта:
a – максимальный размер пор – 50 мкм;
b – максимальный размер пор – 300 мкм;
c – максимальный размер пор – 1000 мкм



Противоугонные системы

Нормы и правила

Противоугонные системы должны отвечать требованиям нормативных положений ЕЭК R18 [1] и R116 [2]. В случае несанкционированного вмешательства активированная система сигнализации должна быть способна выдавать звуковые и визуальные сигналы тревоги. В различных странах страховые компании могут предъявлять те или иные дополнительные требования.

Разрешенные сигналы тревоги

- Прерывистые звуковые сигналы: (продолжительность 25–30 с, частота 1800–3550 Гц.
  уровень звукового давления минимум 105 дБ(А), максимум 118 дБ(А) на расстоянии 2 м.
- Визуальные мигающие сигналы (максимальная продолжительность – 5 минут).

Конструкция системы

Система противоугонной сигнализации включает центральный блок управления, датчики, определяющие вмешательство, и сирену (см. рис. 1).

Датчики:

- контактные датчики дверей;
- датчики системы мониторинга салона;
- датчик наклона кузова;
- датчик системы самоконтроля сирены.

Блок управления системы противоугонной сигнализации

Управление системой противоугонной сигнализации осуществляется блоком управления, являющимся частью системы обеспечения комфорта. Система противоугонной сигнализации активируется или деактивируется механическими замками или посредством дистанционного радиоуправления. При поступлении команды «Охрана» активируется система мониторинга состояния датчиков системы. При необходимости отдельные датчики могут быть отключены при помощи специальных кнопок. Эта деактивация применяется однократно следом за командой «Охрана».

Вместе с датчиками активируется также сирена противоугонной сигнализации. После того как сирена переходит в состояние «Активирована», блок управления начинает циклический опрос датчиков.

В случае срабатывания системы отключение сигнализации (например, при помощи

Рис. 1. Система противоугонной сигнализации:
1 – блок управления системы противоугонной сигнализации; 2 – контактный датчик капота; 3 – контактный датчик двери; 4 – ключ с приемопередатчиком дистанционного управления; 5 – сирена; 6 – указатели поворота; 7 – аккумуляторная батарея (заряжаемая); 8 – модуль на крыше с датчиком наклона кузова и датчиком системы мониторинга салона



пульта дистанционного управления) должно вызывать немедленное отключение сигналов. Блок управления должен предотвращать превышение максимально допустимого количества аварийных сигналов на один датчик. Кроме того, перекрытие сигналов не должно вызывать увеличения продолжительности сигналов.

Сирена аварийной сигнализации

Сирена аварийной сигнализации включает электронную систему управления, мембрану (источник звука) и заряжаемую аккумуляторную батарею в качестве резервного источника питания. Звук может генерироваться, например, пьезоэлектрическим динамиком. Связь системы противоугонной сигнализации с блоком управления осуществляется по последовательной однопроводной шине (например, LIN). Сирена может включаться по команде блока управления или определять несанкционированные манипуляции в автономном режиме. При этом осуществляется мониторинг следующих сигналов:

- циклическая связь;
- контакт с выводами 30 и 31;
- уровень напряжения аккумуляторной батареи автомобиля;
- перенапряжение (например, вследствие подключения внешнего источника питания).

Целью является надежное распознавание манипуляций и предотвращение ложных сигналов.



Рис. 2. Ультразвуковая система мониторинга салона
1 – ультразвуковой детектор;
2 – ультразвуковое поле

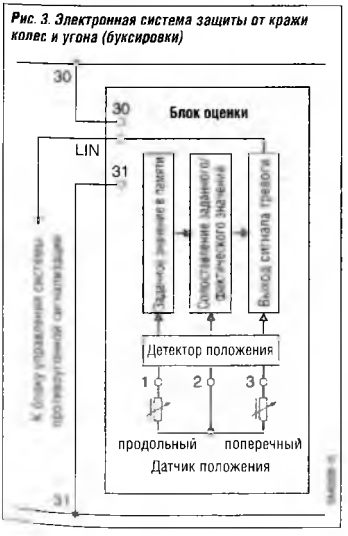


Рис. 3. Электронная система защиты от кражи колес и угона (буксировки)

Датчик наклона кузова

Задача датчика наклона кузова заключается в определении изменения положения кузова в результате поддомкрачивания или буксировки. Для этого используется чрезвычайно чувствительный датчик ускорения. Его сигнал зависит от угла относительно направления силы тяжести. Для контроля положения кузова в продольном и поперечном направлениях используются двухосевые микромеханические датчики (см. рис. 3).

При этом очень большое значение имеет предотвращение ложных сигналов, например, вследствие качки, вызываемой порывами ветра.

Мониторинг салона

Система анализирует отражение ультразвуковых волн или электромагнитных волн СВЧ-диапазона (см. рис. 2). В случае изменения картины отражения срабатывает система противоугонной сигнализации. Здесь также большое значение имеет предотвращение ложных сигналов.

Список литературы:

[1] ECE-R18: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to their protection against unauthorized use.

[2] ECE-R18: Uniform technical regulations on the protection of motor vehicles against unauthorized use.

Автомобильное электрооборудование

Источники электрического тока

Требования

Электрооборудование автомобиля включает в себя генератор как преобразователь энергии, одну или несколько аккумуляторных батарей и устройства-электропотребители. Энергия аккумуляторной батареи подается на стартер, который затем запускает двигатель автомобиля. Во время работы автомобиля на систему зажигания, систему впрыска топлива, блоки управления, системы обеспечения безопасности и комфорта, освещения и другое оборудование подается электрическое питание. Генератор подает необходимое электрическое питание на эти компоненты и заряжает аккумуляторную батарею.

Повышение требований к комфорту и безопасности приводит к значительному росту энергопотребления в бортовой сети. Кроме того, продолжающаяся тенденция к электрификации все большего числа компонентов (например, регулировка сидений, электрический стояночный тормоз, электроусилитель рулевого управления). Номинальная мощность генераторов варьируется от 1 кВт в субкомпактном классе до более 3 кВт в представительском классе. Это меньше, чем в общей сложности требуется потребителям. Другими словами, аккумуляторная батарея тоже должна подавать электрическое питание во время работы автомобиля. Все компоненты должны быть рассчитаны таким образом, чтобы баланс заряда аккумуляторной батареи был всегда положительным или хотя бы равным.

Функция автомобильного оборудования

Генератор подает электрический ток (I_G, рис. 1) во время работы двигателя. Чтобы зарядить аккумуляторную батарею, генератор должен увеличить напряжение в бортсети выше напряжения батареи с разомкнутым контуром. Однако генератор способен сделать это лишь тогда, когда включенные потребители не потребляют ток больше, чем генератор может создать. Если ток нагрузки оборудования I_V в бортсети больше тока генератора I_G (например, на холостых оборотах), то аккумуляторная батарея будет разряжаться. Напряжение в бортсети падает до уровня напряжения батареи, откуда потребляется ток.

Максимальный ток генератора очень сильно зависит от оборотов и температуры генератора. На холостых оборотах генератор может давать лишь 55–65% номинальной мощности. Однако сразу после холодного пуска зимой генератор начиная со средних оборотов, способен подавать в бортовую сеть до 120% своей номинальной мощности. Когда двигатель горячий, моторный отсек нагревается до 60–120°C в зависимости от окружающей температуры и нагрузки на двигатель. Высокая температура в моторном отсеке увеличивает сопротивление обмоток, что уменьшает максимальную мощность генератора.

Должно обязательно гарантироваться равновесие заряда батареи путем правильного подбора аккумуляторной батареи, генератора,

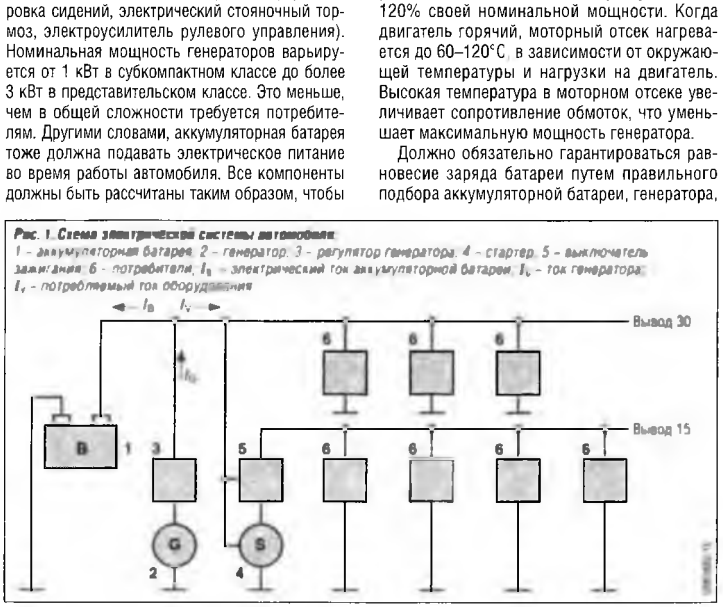


Рис. 1. Схема электрической системы автомобиля
1 – аккумуляторная батарея; 2 – генератор; 3 – регулятор генератора; 4 – стартер; 5 – выключатель зажигания; 6 – потребители; I_B – электрический ток аккумуляторной батареи; I_G – ток генератора; I_V – потребляемый ток оборудования

стартера и другого электрооборудования, чтобы двигатель мог всегда запуститься и, при выключенном двигателе можно было в течение достаточно долгого времени включать различные электропотребители.

Схема и принцип работы бортовой сети напряжением 14 В

Схема

Электрическую схему автомобиля можно представить как взаимодействие преобразователя энергии (генератора), аккумулятора энергии (аккумуляторной батареи) и потребителей (рис. 1).

Генератор приводится через клиновой ремень от коленчатого вала двигателя и преобразует механическую энергию в электрическую. Регулятор генератора ограничивает выходную мощность таким образом, чтобы не превышалось заданное регулятором напряжение (14,0–14,5 В).

Когда ключ вынут из замка зажигания, напряжение подается лишь на несколько потребителей (охранная сигнализация, радиоприемник, дополнительный отопитель и пр.). Вывод, через который запитываются эти потребители, называется «вывод 30» (постоянный плюс).

Прочие потребители подключаются к «выводу 15». Когда ключ зажигания находится в положении «зажигание ВКЛ», напряжение батареи подается на этот контакт, и все потребители подключаются к питанию.

Места размещения аккумуляторной батареи

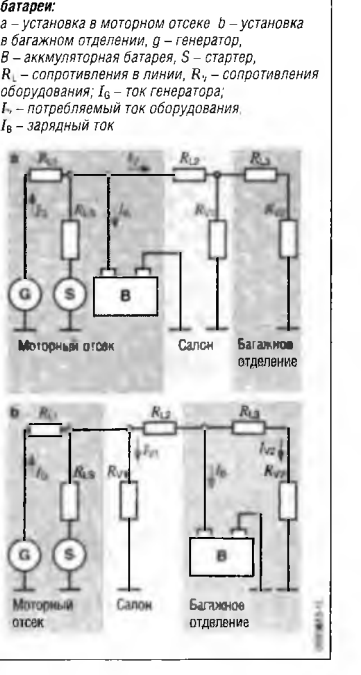
В большинстве автомобилей аккумуляторная батарея размещается в моторном отсеке. Однако большая аккумуляторная батарея (например, на 100 А·ч) занимает много места и иногда, когда свободное пространство в моторном отсеке ограничено, ее не удается туда установить. Еще одним аргументом против установки аккумуляторной батареи в моторном отсеке является потенциально очень высокая окружающая температура. В качестве альтернативы аккумуляторную батарею можно устанавливать в багажном отделении или в салоне (например, под сиденьем переднего пассажира).

Влияние места установки аккумуляторной батареи на зарядное напряжение

Расстояние между акумуляторной батареи, установленной в моторном отсеке, и генератором короче, чем когда акумуляторная батарея устанавливается в багажном отделении. Это сказывается на повышенном сопротивлении проводов и непосредственно влияет на падение напряжения в них. Падение напряжения можно минимизировать посредством соответствующих сечений проводов и хорошего контакта с небольшим сопротивлением контактов, даже по истечении длительного времени.

На рис. 2, а показаны условия для установки в моторном отсеке. Для аккумуляторной батареи, установленной в багажном отделении, требуются более длинные провода с дополнительным сопротивлением R_{L2} (рис. 2, b). Из-за большего падения напряжения зарядное напряжение аккумулятороной батареи, установленной в багажном отделении будет меньше. Дополнительную разность напряжения, вызванную величиной R_{L2}, можно сбалансировать путем увеличения номинального напряжения генератора. Это увеличивает мощность генератора.

Рис. 2. Места размещения аккумулятороной батареи:
a – установка в моторном отсеке b – установка в багажном отделении, g – генератор, B – аккумуляторная батарея, S – стартер, R_L – сопротивления в линии, R_V – сопротивления оборудования; I_G – ток генератора; I_V – потребляемый ток оборудования I_B – зарядный ток



Влияние места установки аккумуляторной батареи на возможность запуска

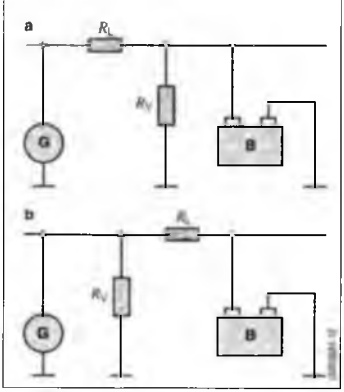
Возможность запуска зависит от напряжения, подаваемого на стартер. Чем выше это напряжение, тем выше обороты стартера при запуске. Из-за высокого пускового тока сопротивление проводов ключевым образом влияет на это напряжение. В случае, когда аккумуляторная батарея устанавливается в багажном отделении, провода между батареей и стартером оказываются длиннее, чем когда она устанавливается в моторном отсеке; соответственно, сопротивление и падение напряжения выше. Запуск улучшается, когда аккумуляторная батарея устанавливается в моторном отсеке и когда провода между ней и стартером короткие.

Влияние окружающей температуры

Высокая температура в моторном отсеке может вызвать температурно-зависимые изменения в аккумуляторной батарее (например, газообразование), что отрицательно сказывается на сроке службы батареи. Высокую температуру батареи можно уменьшить экранированием.

При низкой окружающей температуре аккумуляторной батарее, установленной в багажнике, требуется больше времени для достижения рабочей температуры. При слишком низкой температуре аккумуляторной батареи она плохо заряжается. Это, в свою очередь, приводит к нарушению зарядного баланса и низкому заряду, что ускоряет процесс старения батареи (происходит сульфатация).

Рис. 3. Варианты подключения потребителей:
a – подключение потребителей со стороны аккумуляторной батареи; b – подключение потребителей со стороны генератора; G – генератор; B – аккумуляторная батарея; R_L – сопротивление линии; R_v – сопротивление потребителей



Влияние места установки аккумуляторооной батареи на стабильность напряжения

Поскольку в батарее может аккумулироваться только постоянный ток, вырабатываемый генератором переменный ток необходимо выпрямить. Эта операция выполняется диодным выпрямителем, встроенным в генератор. Выпрямление переменного тока создает пульсирующее напряжение постоянного тока. Кроме того, переключение диодов – когда ток коммутируется с одного диода на следующий – создает высокочастотные колебания напряжения, которые сглаживаются, насколько это возможно, помехоподавляющим конденсатором.

Скачки или пульсации напряжения могут нарушить работу или даже вызвать повреждение электронных потребителей (например, ЭБУ). Аккумуляторная батарея может использовать свою большую емкость для сглаживания колебаний напряжения. Однако из-за сопротивления проводов R_L между генератором и батареей они не полностью подавляются в генераторе. Когда потребители подключаются со стороны батареи (рис. 3, a) или после батареи (например, R_{V1} и R_{V2} на рис. 2, a), на них подается хорошо сглаженное напряжение бортовой сети. Когда потребители подключаются со стороны генератора, т.е. непосредственно к генератору (рис. 3, b), имеют место более сильные пульсации и скачки напряжения.

Таким образом, электропотребители, характеризуемые высоким потреблением тока и относительно нечувствительные к перенапряжению, должны подсоединяться со стороны генератора, а нагрузка, чувствительная к напряжению с низкими токами потребления, должна подсоединяться со стороны аккумуляторной батареи.

Выходная мощность потребителей

Классификация потребителей

Электролотребители имеют разную длительность включения. Различают:

- постоянные нагрузки, включенные всегда (электрический топливный насос, блок управления двигателем);
- длительные нагрузки, включаемые по необходимости и остающиеся включенными в течение длительного времени (фары ближнего света, радиоприемник, вентилятор радиатора);
- кратковременные нагрузки, включаемые лишь на короткое время (указатели поворотов, стоп-сигналы, электрорегулировка сидений, электростеклоподъемники).

Требования к электрической нагрузке, зависящие от времени работы

Потребности в электрической энергии не являются постоянными. Первые минуты после запуска двигателя обычно характеризуются большой потребляемой мощностью (обогрев заднего стекла, сидений, зеркал), после чего происходит резкое падение потребляемой мощности.

Эти потребители выключаются через несколько минут. Здесь требования к электрической нагрузке главным образом определяются постоянной и длительной нагрузкой.

Безнагрузочные потребители

Различным ЭБУ и потребителям требуется питание даже тогда, когда автомобиль стоит на стоянке. Безнагрузочный ток составляется из общего тока этих включенных потребителей. Большинство этих потребителей выключаются вскоре после выключения двигателя (например, освещение салона). Некоторые же всегда остаются включенными (например, система охранной сигнализации).

Безнагрузочный ток должен подаваться аккумуляторной батареей. Максимальное значение безнагрузочного тока определяется автопроизводителями. Расчет параметров аккумуляторной батареи помимо всего прочего, базируется и на этом значении.

Типичная величина безнагрузочного тока в легковом автомобиле составляет 3–10 мА.

Выходная мощность генератора

Важными компонентами генератора являются статор (рис. 4) и ротор, приводимый через клиновой ремень от коленчатого вала. При протекании тока возбуждения через катушку ротора образуется магнитное поле и в трех обмотках статора создается наведенное напряжение переменного тока. Ток возбуждения отбирается из генерируемого тока (самовозбуждение). Наведенное напряжение зависит от скорости вращения ротора и тока возбуждения. Напряжение переменного тока выпрямляется диодами.

Рис. 4. Взаимодействие генератора, регулятора генератора и аккумуляторной батареи:
1 – аккумуляторная батарея; 2 – ротор генератора; 3 – статор генератора; 4 – регулятор генератора; 5 – выпрямительные диоды; 6 – индикатор заряда; 7 – выключатель зажигания; DF – вывод обмотки возбуждения динамо; DFM – контроль обмотки возбуждения динамо



Поскольку наводимое в генераторе напряжение зависит от оборотов вращения ротора и, соответственно, от оборотов двигателя, то на низких оборотах напряжение будет небольшим. На холостых оборотах двигателя n_L генератор может вырабатывать лишь часть номинального тока, если он имеет традиционное соотношение оборотов в диапазоне от 1:2,5 до 1:3 (отношение оборотов коленчатого вала к оборотам ротора генератора) (рис. 5). Номинальный ток достигается при полной нагрузке при оборотах ротора в 6000 мин$^{-1}$. Для достижения номинальной мощности генератора средняя скорость вращения ротора во время эксплуатации автомобиля должна быть значительно выше. Особенно критичны циклы работы генератора при длительной работой двигателя на холостом ходу, так как выдаваемая генератором мощность настолько мала, что аккумуляторная батарея при высоком энергопотреблении разряжается.

Если напряжение генератора выше, чем напряжение батареи, то по ней будет протекать зарядный ток, заряжая ее. Напряжение ограничивается регулятором генератора, с тем чтобы в бортовой сети поддерживалось напряжение около 14 В.

Выработка генератором электроэнергии также влияет на расход топлива. Увеличение расхода на каждые 100 Вт составляет около 0,17 л на 100 км, в зависимости от эффективности генератора и двигателя.

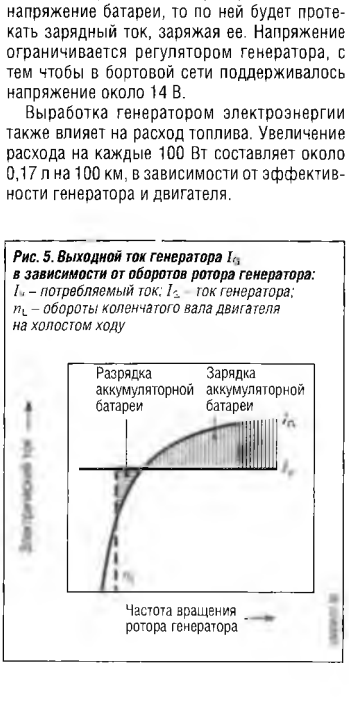


Рис. 5. Выходной ток генератора I_G в зависимости от оборотов ротора генератора: *$I_м$ – потребляемый ток; I_G – ток генератора; n_L – обороты коленчатого вала двигателя на холостом ходу*

Регулирование напряжения в бортовой сети

Создание магнитного поля при запуске

Магнитное поле необходимо в роторе для наведения напряжения в обмотках статора. После запуска самовозбуждение невозможно на малых оборотах. Поэтому первое возбуждение генератора после запуска выполняет аккумуляторная батарея.

Крутящий момент генератора, работающего под нагрузкой, будет препятствовать запуску и стабилизации холостого хода двигателя. Поэтому современные регуляторы уменьшают ток возбуждения при запуске (управляемое предварительное возбуждение). Генерирование тока откладывается до тех пор, пока двигатель не наберет нужные обороты (запуск по изменению нагрузки, LRS). До этого момента потребители запитываются от аккумуляторной батареи.

Регулирование напряжения во время работы двигателя

Регулятор корректирует поле возбуждения посредством тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в обмотке ротора таким образом, что напряжение на плюсовой клемме аккумуляторной батареи (B+) соответствует заданному. Частота сигнала ШИМ составляет 40–200 Гц; коэффициент заполнения периода импульса зависит от потребляемой мощности. При изменении нагрузки изменяется напряжение в бортовой сети, при этом регулятор корректирует поле возбуждения путем адаптирования сигнала ШИМ в целях компенсации напряжения.

Соединение обмотки возбуждения называют динамо-полем (DF). Регулятор генератора выдает сигнал ШИМ по сигналу DFM для сообщения другим ЭБУ об использовании мощности генератора.

Для регулировки регулятору требуется напряжение аккумуляторной батареи. Это значение он получает через плюсовую клемму B+. В случае длинных проводов и больших токов в этих проводах падение напряжения между аккумуляторной батареей и регулятором может быть настолько большим, что уменьшится выработка генератором электроэнергии и аккумуляторная батарея будет недостаточно заряжаться. Этой проблемы можно избежать с помощью S-контакта, подающего на регулятор напряжение аккумуляторной батареи по проводу, отдельно подключаемому к плюсовой клемме аккумуляторной батареи.

Подключение регулятора к шине (например, шине LIN) позволяет системе изменять заданное значение, на которое нужно отрегулировать напряжение. Это делает возможными такие функции, как, например, рекуперация.

Функция движения в зависимости от нагрузки осуществляет линейное изменение напряжения генератора до заданного значения во время движения после подключения большой нагрузки и связанного с этим резкого падения напряжения генератора. Эта функция предотвращает резкую нагрузку двигателя из-за генератора.

Индикатор заряда

Индикатором заряда управляет регулятор генератора. Индикатор загорается при включении зажигания и гаснет, когда генератор подает ток. Регулятор активирует индикатор заряда, как только обнаруживает неисправность (например, у генератора – из-за обрыва клинового ремня, обрыва или короткого замыкания цепи возбуждения, обрыва провода между генератором и аккумуляторной батареей).

Зарядка аккумуляторной батареи

Из-за происходящих в аккумуляторной батарее химических процессов идеальное зарядное напряжение должно быть больше при низких температурах и меньше при высоких. Напряжение «закипания» – максимально допустимое зарядное напряжение, при котором в аккумуляторной батарее не появляется газ. Регулятор генератора ограничивает напряжение, если ток генератора I_G больше суммарного потребляемого тока I_V и зависимого от температуры максимально допустимого зарядного тока I_B.

Регуляторы обычно монтируются на генератор. При наличии значительных отклонений между температурами регулятора напряжения и электролитом в аккумуляторной батарее лучше наблюдать температуру регулятора напряжения прямо на аккумуляторной батарее.

Расположение генератора, аккумуляторной батареи и потребителей влияет на падение напряжения в зарядном проводе и, соответственно, на зарядное напряжение. Суммарный ток $I_G = I_B + I_V$ протекает через зарядный провод, если все электрооборудование подключено к аккумуляторной батарее. Зарядное напряжение является более низким из-за высокого падения напряжения. Если все потребители электрической энергии подсоединены со стороны генератора, то падение напряжения – ниже, а зарядное напряжение выше. Регулятор может учитывать падение напряжения путем измерения фактического напряжения прямо на аккумуляторной батарее.

Схемы бортовой сети

Бортовая сеть с одной аккумуляторной батареей

На рис. 1 изображена схема бортовой сети с одной аккумуляторной батареей, главным образом применяющейся на легковых автомобилях. Работая как аккумулятор энергии, батарея подает ток для запуска двигателя и обеспечивает питание потребителей при отсутствии выработки энергии генератором (когда двигатель выключен) или недостаточной мощности генератора (работа двигателя на холостых оборотах). Это на сегодняшний день самая распространенная концепция, так как является наиболее экономически эффективной для автомобилей.

В конструкции автомобильной аккумуляторной батареи для бортовой сети с одной аккумуляторной батареей, запитывающей и стартер, и другие потребители, необходимо найти компромисс между различными требованиями. Во время запуска двигателя аккумуляторная батарея подвергается большим токовым нагрузкам (300–500 А). Соответствующее падение напряжения отрицательно сказывается на работе определенного электрооборудования (например, происходит сброс напряжения на блоках с микроконтроллерами) и должно быть как можно меньшим.

При обычной же эксплуатации автомобиля протекают лишь относительно малые токи. Емкость аккумуляторной батареи – важнейший фактор в обеспечении надежного электропитания. И мощность, и емкость нельзя улучшить одновременно.

Схема с двумя аккумуляторными батареями

В бортовых сетях с двумя аккумуляторными батареями – пусковой и универсальной – функции запуска двигателя и электропитания потребителей разделены блоком управления бортовой сети (рис. 6) для предотвращения падений напряжения при запуске и гарантирования надежного запуска в мороз даже при низком уровне заряда универсальной аккумуляторной батареи.

Пусковая аккумуляторная батарея
Пусковая аккумуляторная батарея должна отдавать значительный ток в течение ограниченного времени (при запуске двигателя). Поэтому она рассчитывается на высокую плотность мощности (большая мощность при малом весе). Компактные размеры аккумуляторной батареи позволяют устанавливать ее в непосредственной близости от стартера с короткими подсоединительными проводами (малое падение напряжения в проводе). Емкость уменьшается.

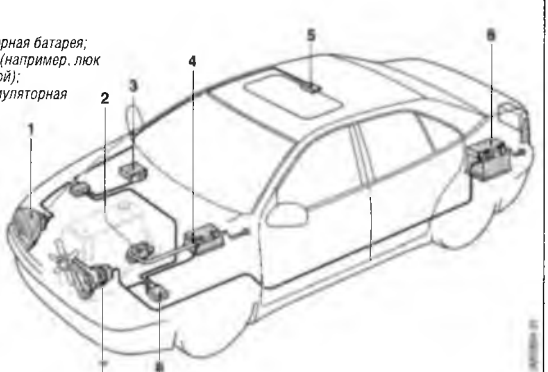
Универсальная аккумуляторная батарея
Эта аккумуляторная батарея лишь запитывает бортовую сеть (кроме стартера). Она подает ток на потребителей (например, около 20 А на систему управления двигателем). Она рассчитана на очень большие циклические колебания, т.е. может отдавать и запасать существенные объемы энергии. Расчет параметров аккумуляторной батареи базируется в основном на резервах емкости, необходимых для потребителей, работающих при выключенном двигателе (например, приемник дистанционного управления центрального замка, охранная сигнализация), и минимально допустимом уровне заряда.

Блок управления электропитанием
Блок управления электропитанием в бортовой сети с двумя аккумуляторными батареями отделяет пусковую аккумуляторную батарею и стартер от остальной бортовой сети, при условии, что она получает достаточное питание от универсальной аккумуляторной батареи. Поэтому он предотвращает падение напряжения при запуске двигателя, влияющее на работу автомобильной бортовой сети. Когда автомобиль стоит на стоянке, это предотвращает разряд пусковой аккумуляторной батареи электрооборудованием, потребляющим ток во включенном состоянии, и устройствами, находящимися в режиме ожидания.

При отделении пусковой аккумуляторной батареи от остальной электрической системы теоретически не существует пределов напряжения пусковой аккумуляторной батареи. Следовательно, напряжение заряда можно оптимально адаптировать к универсальной аккумуляторной батарее с помощью преобразователя DC/DC в целях минимизации времени зарядки.

Если в универсальной аккумуляторной батарее не окажется заряда, то блок управления может временно соединить обе системы. Это означает, что бортовая сеть автомобиля может использовать полностью заряженную пусковую аккумуляторную батарею. В другой возможной конфигурации блок управления запуском может подключать потребители, имеющие отношение к запуску двигателя, к той аккумуляторной батарее, которая полностью заряжена.

Рис. 6. Схема с двумя аккумуляторными батареями:
1 – система освещения,
2 – стартер;
3 – ЭБУ двигателя;
4 – пусковая аккумуляторная батарея;
5 – прочие потребители (например, люк со сдвижной крышкой);
6 – универсальная аккумуляторная батарея;
7 – генератор,
8 – ЭБУ электрической системы



Параметры бортовой сети

Состояние заряда

Состояние заряда (SOC) аккумуляторной батареи – один из наиболее важных параметров в электрической системе автомобиля. Его можно определить как отношение объема имеющегося в аккумуляторной батарее заряда (текущего состояния заряда) к максимальному объему заряда, которое может аккумулировать новая аккумуляторная батарея.

$$SOC = \frac{Q_{act}}{Q_{max}}$$

Значение Q_{max} получается при разрядке полностью заряженной аккумуляторной батареи с разрядным током I_{20} – соответствует одной двадцатой от номинальной емкости в амперах (5 А для аккумуляторной батареи емкостью 100 А·ч) – до достижения уровня напряжения 10,5 В. Величина заряда, потерянного во время разрядки, соответствует Q_{max}.

Поскольку таким образом значение Q_{max} можно получить только одним измерением, его можно также часто определить по номинальной емкости аккумуляторной батареи, указываемой на этикетке, где: $Q_{max} = K_{20}$ (номинал).

Накопленный заряд Q_{act} получается из разности между Q_{max} и количеством заряда, потраченного при разряде полностью заряженной аккумуляторной батареи. Таким образом, состояние заряда АКБ можно просто определить через Q_{act}.

Состояние заряда аккумуляторной батареи непосредственно связано с плотностью электролита, где установившееся напряжение аккумуляторной батареи пропорционально плотности электролита. Окончательное напряжение, получаемое после зарядки или разрядки аккумуляторной батареи, называется установившимся напряжением. Процесс достижения установившегося напряжения, из-за медленной диффузии и поляризации в АКБ, может занимать несколько дней. Установившееся напряжение измеряется на клеммах аккумуляторной батареи.

Состояние заряда можно определить по формуле:

$$SOC = \frac{(U_{current} - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})},$$

где

$U_{current}$ – текущее установившееся напряжение;

U_{max} – установившееся напряжение полностью заряженной аккумуляторной батареи (SOC = 100 %);

U_{min} – установившееся напряжение аккумуляторной батареи при SOC = 0 %. Поскольку зависимость установившегося напряжения от состояния заряда нелинейна при низком заряде (меньше 20%), то здесь нужно использовать значение, линейно экстраполированное к SOC = 0 %.

Таким образом, можно определить состояние заряда по измеренному установившемуся напряжению.

Состояние неисправности аккумуляторной батареи

Аккумуляторные батареи подвержены старению. Различные эффекты старения вызывают потерю способности накапливать номинальный заряд и потерю емкости. Еще один эффект имеет место, когда аккумуляторные батареи разряжаются большими токами, возникают потери напряжения из-за высокого внутреннего сопротивления по сравнению с новыми аккумуляторными батареями. Этот феномен выражается состоянием исправности аккумуляторной батареи (SOH).

Для оценки аккумуляторной батареи ее работа выражается определенной характеристикой электрического тока, которая может соответствовать, например, запуску двигателя. Новая аккумуляторная батарея подвергается нагрузке при идентичных условиях (температура, разрядный ток). Эта аккумуляторная батарея может использоваться для

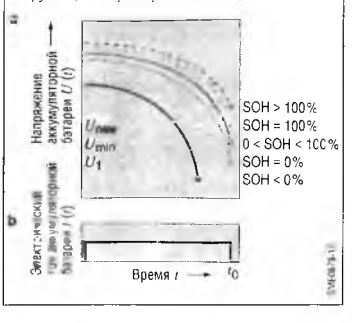


Рис. 7. Определение значения SOH:
a – кривая напряжения аккумулятоной батареи под нагрузкой, b – характеристика электрического тока

определения значения SOH. Через определенное время t_0 напряжение АКБ падает до значения U_{new} (рис. 7). Значение напряжения у более старой аккумуляторной батареи через время t_0 составит U_{min}. U_1 – это не более чем допустимое напряжение. SOH определяется по формуле:

$$SOH = \frac{(U_{min} - U_1)}{(U_{new} - U_1)}.$$

У новой аккумуляторной батареи SOH = 1. При SOH = 0 аккумуляторная батарея едва достигает порогового значения U_1. При SOH < 0 аккумуляторная батарея непригодна для использования.

Состояние функционирования

Во время работы значение SOH само по себе не может указывать на то, что аккумуляторная батарея все еще в состоянии выполнять свои функции. Причина в том, что SOC, SOH и температура могут компенсировать друг друга. Маленькое значение SOC допустимо для новой аккумуляторной батареи с большим SOH, в то время как маленькое SOH у старой аккумуляторной батареи может быть скомпенсировано высоким уровнем заряда (SOC).

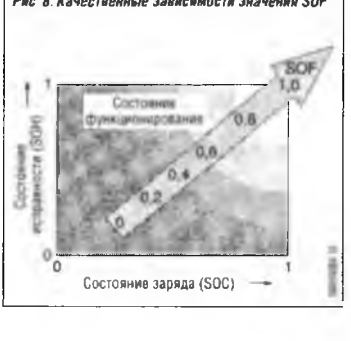
Способность аккумуляторной батареи выполнять требуемые функции в своем текущем состоянии (т.е. текущем состоянии SOC, SOH и температуры) описывается состоянием функционирования (SOF). Этот параметр сочетает значения SOC и SOH и температуру. SOF определяется аналогично SOH. Параметры SOC, SOH и температура служат для прогнозирования способности аккумуляторной батареи выполнять свои функции в текущем состоянии. С другой стороны, SOH лишь применяется к определенным значениям SOC и температуры и поэтому является количественным параметром, характеризующим аккумуляторную батарею.

$$SOF = \frac{(U_{min} - U_1)}{(U_{new} - U_1)}.$$

Это значение SOF применяется к текущим значениям SOC, SOH и температуры.

На рис. 8 показана качественная зависимость SOF от SOC и SOH при данной температуре. Значение SOC, изменяющееся при разряде с 1 до 0 отображается на оси x. На оси y показано значение SOH, которое у новой аккумуляторной батареи равно 1. На этой схеме видно, что в определенных пределах старение аккумуляторной батареи (маленькое SOH) может компенсироваться более высоким SOC.

Рис. 8. Качественные зависимости значения SOF



Использование мощности генератора

Ток, протекающий по обмотке возбуждения в генераторе, определяет напряжение, наводимое в обмотках статора. Регулятор генератора устанавливает необходимый ток возбуждения на основе коэффициента заполнения периода импульса (ШИМ-сигнала). Вывод обмотки возбуждения (DF) – это контакт, через который подается ток возбуждения. Коэффициент заполнения периода импульса ШИМ-сигнала показывает использование мощности генератора, т.е. наличие у него резервов для запитывания дополнительно подключаемых нагрузок.

Регулятор генератора дополнительно выводит этот сигнал в виде сигнала DFM (контроля обмотки возбуждения динамо). Регуляторы с шинным интерфейсом применяют этот коэффициент заполнения периода импульса к шине. Ток возбуждения также выводится в амперах. Различные ЭБУ анализируют сигнал DFM, чтобы, например, выключить обогрев сидений или лобового стекла, когда мощность генератора используется очень интенсивно.

Управление электроэнергией

Мотивация

Снижение расхода топлива

Одной из главных целей автопроизводителей является сокращение расхода топлива и выбросов парниковых газов, в частности CO_2. Это достигается путем оптимизации потоков энергии в автомобилях. Оптимизация включает в себя:

- избегание потерь на холостых оборотах с помощью функции «Старт-стоп» (автоматическое выключение и запуск двигателя, например, на светофоре);
- повышение эффективности выработки электроэнергии путем оптимизации генератора и интеллектуальной активации генератора (рекуперации);
- аксессуары с электроприводом для упрощения активации путем изолирования от ДВС.

Потребляемая мощность

Дополнительные функции, обеспечивающие комфорт, и аксессуары с электроприводом повышают энергопотребление; одновременно снижается диапазон скоростей для выработки электроэнергии (например, из-за эксплуатации в режиме «пуск-стоп»). Новые обеспечивающие комфорт функции и функции безопасности (например, электроусилитель руля, электрический насос охлаждающей жидкости, дополнительный отопитель, электрический климат-контроль в автомобилях с функцией «Старт-стоп») требуют дополнительную электрическую мощность, в таком количестве, что имеет смысл интеграция системы управления электроэнергией (EEM).

Задача системы управления электроэнергией

Система управления электроэнергией управляет потоками энергии и в то же время обеспечивает электропитание для сохранения возможности запуска двигателя и уменьшения количества поломок из-за разрядившейся аккумуляторной батареи. Система управления электроэнергией также стабилизирует напряжение и оптимизирует готовность систем комфорта – даже когда двигатель выключен. Этого можно достичь путем обеспечения положительного или хотя бы равного зарядного баланса во время эксплуатации автомобиля и путем контроля потребляемой мощности, когда двигатель выключен. Кроме того, пиковые нагрузки можно уменьшить путем скоординированного включения электропотребителей. Координацию выполняет система управления электроэнергией (рис. 9).

Рис. 9. Управление электроэнергией (EEM)



Иногда принимаемые меры конфликтуют между собой. Например, выключение функций комфорта приводит к потере комфорта, а функции «Старт-стоп» – к увеличению расхода топлива. Разные автопроизводители предпочитают разные меры, и возможные меры для сохранения зарядного баланса соответственно становятся приоритетом.

Задачи системы управления электроэнергией

Управление нагрузкой в безнагрузочном режиме (управление током без нагрузки)

Датчик аккумуляторной батареи регулярно контролирует состояние аккумуляторной батареи и, соответственно, возможность запуска двигателя. С помощью точного распознавания состояния аккумуляторной батареи можно оптимизировать готовность потребителей посредством управления с током без нагрузки, т.е. максимизировать время работы функций комфорта. В случае временной невозможности запуска двигателя система управления электроэнергией может, например, отправить сообщение на дисплей. Кроме того, при угрозе невозможности запуска двигателя система управления электроэнергией уменьшает энергопотребление (например, путем уменьшения потребляемой мощности вентилятора кондиционера) вплоть до выключения отдельных потребителей, чтобы как можно дольше сохранить возможность запуска двигателя. Примеры таких потребителей – дополнительный отопитель, информационно-развлекательная система, система навигации, радиоприемник и телефон.

Управление энергией во время работы двигателя

Функция системы управления энергией при работающем генераторе, в дополнение к управлению нагрузкой, в принципе представляет собой управление генератором, включая функцию рекуперации и интерфейс системы управления энергией с другими системами – например, системой управления двигателем.

Включение потребителей

Система управления нагрузкой координирует включение и выключение потребителей с целью уменьшения пиков мощности. Система управления нагрузкой также участвует в управлении высокоэффективными системами отопления (обогрев ветрового стекла и вспомогательный отопитель на резисторах с положительным температурным коэффициентом)

При эксплуатации автомобиля обеспечение возможности запуска двигателя также является главной функцией системы управления энергией. При критических состояниях аккумуляторной батареи система управления нагрузкой уменьшает потребляемую электрическую мощность, чтобы как можно быстрей подзарядить аккумуляторную батарею. Обеспечивающие комфорт потребители резервуарного типа (системы отопления) переключаются приоритетно, так как интеллектуальное включение можно использовать для как можно более длительной задержки ощутимых отклонений от номинальных характеристик.

Существуют пределы отключения функций комфорта в том плане, что оно будет допускаться пользователем только в редких исключительных ситуациях. Поэтому электрическая система автомобиля должна настраиваться таким образом, чтобы такие ситуации возникали редко. Заметные последствия должны сигнализироваться пользователю, чтобы он мог определить отклонение характеристик от нормы.

Увеличение выходной мощности генератора

В качестве альтернативы или дополнения к уменьшению потребляемой мощности можно за счет увеличения оборотов двигателя увеличить выработку электроэнергии генератором (например, повышение холостых оборотов или деактивация выключения двигателя в режиме «Старт-стоп»). Например, чтобы увеличить холостые обороты, система управления электроэнергией по шине передачи данных отправляет запрос системе управления двигателем. Эти меры непосредственно влияют на расход топлива и акустику, и поэтому должны оптимально адаптироваться к конкретному автомобилю.

В процессе рекуперации кинетическая энергия автомобиля как минимум частично преобразуется в электрическую и накапливается в аккумуляторной батарее. Для этого требуется генератор, управляемый через интерфейс для ввода нужного рабочего напряжения, и датчик для определения состояния аккумуляторной батареи. Саму

функцию можно условно разделить на электронику двигателя, интерфейс или компьютер.

Во время движения накатом напряжение увеличивается, чтобы генератор более интенсивно заряжал аккумуляторную батарею. В этот момент электроэнергия вырабатывается без расхода топлива. В ситуациях с плохой эффективностью выработки электроэнергии напряжение генератора уменьшается, и аккумуляторная батарея снова медленно разряжается, чтобы минимизировать расход топлива на выработку электроэнергии.

Полностью заряженная аккумуляторная батарея не может накапливать заряд. По этой причине рекуперация возможна лишь с частично заряженной аккумуляторной батареей (частичное состояние заряда, PSOC). Это отступление от традиционной стратегии зарядки, цель которой – достижение как можно более полного заряда аккумуляторной батареи. Минимальное состояние аккумуляторной батареи, необходимое для запуска двигателя ни при каких обстоятельствах не должно быть хуже, т.е. текущее состояние аккумуляторной батареи должно быть известно системе управления энергией.

Рекуперация приводит к росту циклических колебаний заряда аккумуляторной батареи, влияние которых на старение аккумуляторной батареи должно проверяться в каждом конкретном случае. Поэтому рекомендуется использование аккумуляторной батареи с поглощающим стеклянным матом (AGM) для повышения проходной мощности (проходная мощность в А·ч в течении срока службы, проходная мощность, критичная для срока службы, умножается на коэффициент 3).

Алгоритм рекуперации должен учитывать влияние изменений напряжения на потребителей, поскольку они могут быть значительны (например, изменение скорости вентилятора кондиционера или световых вспышек).

Рекуперация обеспечивает экономию топлива в пределах 1–4 %, в зависимости от цикла и конфигурации функции.

Распознавание состояния аккумуляторной батареи и управление аккумуляторной батареей

Функции

Ключевым элементом в управлении электроэнергией является система распознавания состояния аккумуляторной батареи (BSR), надежно вычисляющая возможности аккумуляторной батареи. В алгоритмах распознавания состояния аккумуляторной батареи в качестве вводных переменных обычно используются измеренные ток, напряжение

Рис. 11. Взаимодействие датчика аккумуляторной батареи, системы определения состояния аккумуляторной батареи и системы управления электроэнергией:
EEM – система управления электроэнергией; BSR – система определения состояния аккумуляторной батареи; EBS – электронный датчик аккумуляторной батареи; SOC – состояние заряда, SOH – физическое состояние; SOF – состояние функционирования; U – напряжение аккумуляторной батареи; I – ток аккумуляторной батареи; T – Температура аккумуляторной батареи



и температура аккумуляторной батареи. На основе этих переменных определяются заряд (SOC), состояние функционирования (SOF) и физическое состояние (SOH) аккумуляторной батареи и передаются в качестве вводных переменных системе управления энергией (рис. 11).

Для измерения параметров аккумуляторной батареи используется датчик, напрямую измеряющий ток и напряжение аккумуляторной батареи. Температура аккумуляторной батареи определяется посредством измерения температуры рядом с батареей, так как прямое измерение температуры электролита требует вмешательства в батарею, что в данном случае невозможно.

Пример

Примером распознавания состояния аккумуляторной батареи может служить определение возможности запуска двигателя по значению SOF. Значение SOF позволяет прогнозировать поведение аккумуляторной батареи, отдающей пусковой ток. Другими словами, система распознавания состояния аккумуляторной батареи определяет падение напряжения для данной характеристики пускового тока (рис. 12). Поскольку минимальное напряжение для успешного запуска двигателя известно, то прогнозируемое падение напряжения позволяет оценить возможность запуска на данный момент. В зависимости от интервала между прогнозируемым падением напряжения и порогом возможности запуска двигателя система управления энергией определяет меры по сохранению или улучшению запуска.

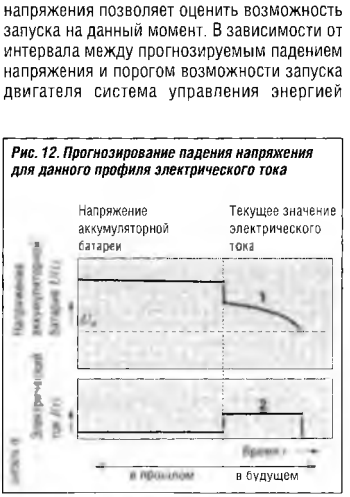
Датчик аккумуляторной батареи

Ток, напряжение и температура аккумуляторной батареи должны измеряться очень точно, динамично и синхронно. В частности, измерение тока от нескольких мА до пусковых токов более 1000 А предъявляет серьезные требования к датчикам. На выводы аккумуляторной батареи устанавливается электронный датчик аккумуляторной батареи (EBS). Поскольку крышка аккумуляторной батареи стандартизирована (DIN 72311 [1]), то размещение датчика на разных батареях не требуется.

Ток измеряется с помощью специального манганинового шунта. Сердцем электронной части датчика аккумуляторной батареи является специализированная интегральная схема, в которой помимо прочего, имеется мощный микропроцессор для регистрации и обработки измеренных значений. Алгоритмы распознавания состояния аккумуляторной батареи также обрабатываются этим микропроцессором. Сообщение с ЭБУ более высокого уровня происходит по шине LIN.

Помимо определения состояния аккумуляторной батареи для системы управления энергией датчик аккумуляторной батареи можно использовать и для других функций. Например, точное измерение тока и напряжения можно также использовать для оперативной диагностики в производственных цехах и ремонтных мастерских (выявление безнагрузочных неисправных потребителей).

Рис. 12. Прогнозирование падения напряжения для данного профиля электрического тока



Литература

[1] DIN 72311: Lead storage batteries; starter batteries; terminals, plugs and filling orifices.

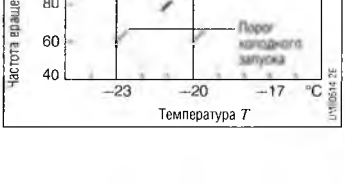
Стартерные аккумуляторные батареи

Требования

Требования к характеристикам пусковых аккумуляторных батарей в современных автомобилях постоянно растут. Дизельные двигатели и двигатели с искровым зажиганием с большим рабочим объемом предъявляют высокие требования к холодному запуску (высокий пусковой ток, особенно в мороз). Электрические системы в автомобилях с полным спектром электрооборудования требуют от аккумуляторных батарей большого количества энергии, если вырабатываемой генератором энергии временно не хватает, или (что нельзя недооценивать), когда двигатель выключен. Суммарная выходная мощность установленного электрооборудования, запитываемого в течение нескольких минут от аккумуляторной батареи, часто превышает 2 кВт. Кроме того, пиковый ток в рабочем режиме, который аккумуляторная батарея должна выдавать в течение дней и даже недель, составляет много тысяч миллиампер.

Помимо этих аспектов, требующих однородного электропитания, аккумуляторные батареи в электрической системе автомобиля должны поддерживать задачи, требующие динамических импульсов с большим током, которые не могут быть обеспечены генератором столь же быстро (для переходных процессов, таких как процессы включения в электрическом усилителе руля). Кроме того, из-за очень большой естественной емкости двухслойного конденсатора (несколько фарад) Аккумуляторная батарея способна великолепно сглаживать пульсации тока в бортсети. Это помогает свести к минимуму и даже устранить проблемы с электромагнитной совместимостью.

Рис. 1. Влияние температуры на обороты стартера и минимальные начальные обороты коленчатого вала двигателя:
1a – обороты, разряд 20%; 1b – обороты, сильный разряд; 2 – минимальные начальные обороты коленчатого вала двигателя; S_1, S_2 – порог холодного запуска



Принимая во внимание вышесказанное, легко понять, почему столько вкладывается средств в оптимизацию характеристик аккумуляторных батарей в процессе производства и обеспечение их работы при обслуживании. Самые передовые аккумуляторные батареи – это те, что не просто обладают необходимыми электрическими свойствами, но и не требуют обслуживания, безопасны для окружающей среды и особенно безопасны в обращении Ожидается, что на автомобили все чаще будут устанавливаться системы с двумя аккумуляторными батареями и устройствами для измерения состояния заряда АКБ для повышения надежности электропитания путем предотвращения полного разряда и своевременной замены аккумуляторной батареи.

Несмотря на технический прогресс, следить за нормальным функционированием аккумуляторной батареи и электрической системы в целом обязан водитель. Отличная способность современных пусковых аккумуляторных батарей накапливать заряд оказывается бесполезной, если не удается достичь положительного зарядного баланса при регулярных коротких поездках по городу зимой (при высоком энергопотреблении и низких оборотах коленчатого вала двигателя). Вообще говоря, сохранение низкого заряда аккумуляторной батареи в течение длительного времени сокращает срок ее службы. Это сдвигает пусковые обороты коленчатого вала двигателя в сторону предельных для холодного пуска (рис. 1).

Аккумуляторные батареи специально разрабатывают в целях удовлетворения отдельных требований электросистемы автомобиля по мощности пуска двигателя, емкости и величине тока зарядки при температурах от –30°C до +60°C. Существуют дополнительные требования для необслуживаемых аккумуляторных батарей, аккумуляторных батарей с защитой от вибраций.

Типичное напряжение бортсети составляет 12 В у легковых автомобилей и 24 В у грузовых; это достигается путем последовательного соединения двух аккумуляторных батарей напряжением 12 В.

Конструкция аккумуляторной батареи

Компоненты

Автомобильные аккумуляторные батареи напряжением 12 В содержат шесть последовательно соединенных и отделенных перегородками гальванических элементов в полипропиленовом корпусе (рис. 2). Каждый гальванический элемент включает наборы положительных и отрицательных пластин. Эти наборы, в свою очередь, состоят из пластин (свинцовая решетка и активная масса) и микропористого материала (сепаратор), который изолирует пластины противоположных полярностей. Сепараторы образуют карманы, в которые погружаются пластины. Электролит представляет собой раствор серной кислоты, который проникает в поры пластин и сепараторы, а также в пустоты гальванических элементов. Полюсные выводы, соединительные элементы гальванических элементов и перемычки пластин выполнены из свинца; щели в перегородках межэлементных соединений тщательно уплотнены. Для обеспечения герметичной связи цельной крышки с корпусом аккумуляторной батареи используется процесс горячей опрессовки. На стандартных аккумуляторных батареях каждый элемент закрывается собственной пробкой с вентиляционным отверстием. Вентиляционные отверстия с закрученными пробками позволяют образующимся при зарядке аккумуляторной батареи газам улетучиваться. У необслуживаемых аккумуляторных батарей, выполненных в герметичном исполнении, нет пробок заливных горловин, однако они также имеют вентиляционные отверстия.

Материал решетчатых пластин

Пластины состоят из свинцовых решеток и активного материала, которым покрываются свинцовые решетки во время производственного процесса. Активный материал положительной пластины содержит пористый диоксид свинца (PbO_2, оранжево-коричневого цвета), а отрицательной пластины – чистый свинец в виде «губчатого свинца» (Pb, серого-зеленого цвета). Другими словами, чистый свинец также имеет крайне пористую форму.

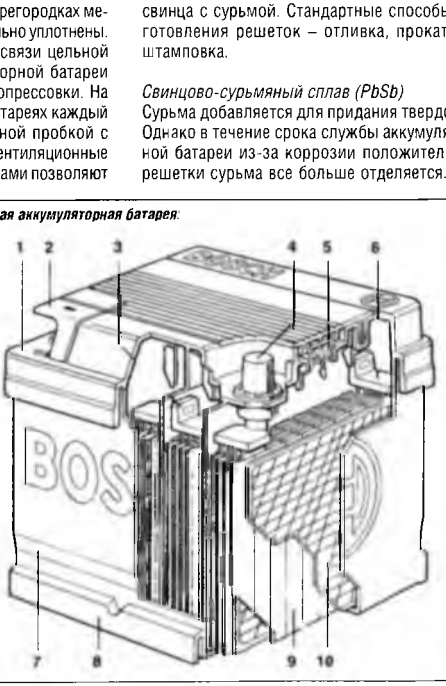
По разным причинам (жидкотекучесть, обработка, механическая прочность, стойкость к коррозии), для решеток используется сплав свинца с сурьмой. Стандартные способы изготовления решеток – отливка, прокатка и штамповка.

Свинцово-сурьмяный сплав (PbSb)

Сурьма добавляется для придания твердости. Однако в течение срока службы аккумуляторной батареи из-за коррозии положительной решетки сурьма все больше отделяется. Она

Рис. 2. Необслуживаемая стартерная аккумуляторная батарея:

1 – монолитная крышка;
2 – крышка выводов;
3 – соединитель гальванических элементов;
4 – полюсный вывод;
5 – перегородка,
6 – перемычка пластин;
7 – корпус;
8 – нижняя направляющая,
9 – положительные пластины, вставленные внутрь сепараторов,
10 – отрицательные пластины



мигрирует к отрицательной пластине, проходя через электролит и сепараторы, и «отравляет» ее, образуя локальные гальванические пары. Эти гальванические пары повышают саморазряд отрицательной пластины и уменьшают напряжение газовыделения. Все это вызывает повышенный расход воды при перезарядке, что способствует высвобождению сурьмы. Этот механизм самовозбуждения приводит к постоянному снижению мощности на протяжении всего срока службы аккумуляторной батареи. Она становится неспособной достичь необходимого заряда, и электролит приходится часто проверять.

Свинцово-кальциевый сплав (PbCa)
Кальций используется для повышения твердости отрицательных пластин. Кальций электрохимически неактивен при потенциальных условиях, существующих в свинцовых аккумуляторных батареях. Это означает, что предотвращается «отравление» отрицательной пластины и саморазряд.

Еще одним преимуществом является высокое напряжение газообразования, стабильное в течение срока службы, и связанный с этим расход воды (меньший по сравнению со сплавом свинца с сурьмой).

Свинцово-кальциевые сплавы с добавлением серебра (PbCaAg)
Помимо снижения содержания кальция и увеличения содержания олова этот сплав также имеет определенный процент серебра (Ag). Он имеет более тонкую структуру решетки и показал себя крайне стойким даже при высоких температурах, ускоряющих коррозию. Это сказывается, когда происходит деструктивный перезаряд при высокой плотности электролита и (что в равной степени нежелательно) в перерывах в эксплуатации при высокой плотности электролита.

Свинцово-кальциево-оловянные сплавы (PbCaSn)
Этот сплав используется для решеток, изготавливаемых непрерывной прокаткой и штамповкой, и содержит гораздо больше олова, чем PbCaAg. Он отличается крайне высокой стойкостью к коррозии при небольшой массе решетки.

Заряд и разряд

Активными материалами в свинцово-кислотной аккумуляторной батарее являются диоксид свинца (PbO_2) на положительных пластинах, губчатый высокопористый свинец (Pb) на отрицательных пластинах и электролит – водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), который одновременно является ионным проводником. По сравнению с электролитом PbO_2 и Pb принимают типичные напряжения (индивидуальные потенциалы). Их величины (независимо от полярности) равны сумме напряжений гальванических элементов, измеряемых снаружи (рис. 3). Это приблизительно 2 В в режиме ожидания. Когда гальванический элемент разряжается, PbO_2 и Pb реагируют с H_2SO_4, образуя $PbSO_4$ (сульфат свинца). Электролит отдает ионы SO_4 и его плотность уменьшается. Во время зарядки активные компоненты PbO_2 и Pb восстанавливаются из $PbSO_4$ (см. главу «Электрохимия»).

Когда на аккумуляторную батарею подается разрядный ток, на ней создается напряжение в зависимости от величины тока и длительности разряда (рис. 4). Из рисунка также видно, что отбираемый у аккумуляторной батареи заряд зависит от величины тока.

Поведение при низких температурах
В принципе, при низких температурах химические реакции в аккумуляторной батарее происходят медленнее. Поэтому пусковая мощность даже полностью заряженной аккумуляторной батареи снижается при падении температуры. Чем больше аккумуляторная батарея разряжается, тем ниже плотность электролита. Так как плотность электролита уменьшается, то его точка замерзания повышается. Аккумуляторная батарея, электролит которой имеет низкую температуру замерзания, способна обеспечивать низкое значение тока, которого бывает недостаточно для пуска двигателя автомобиля.

Характеристики аккумуляторных батарей

Обозначение

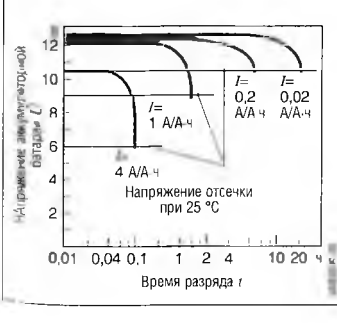
Стартерные аккумуляторные батареи, изготавливаемые в Германии, маркируются с указанием номинального напряжения, номинальной емкости и испытательного тока разряда в холодном состоянии (например, DIN EN 50342, [1], [2], [3]). Стартерные аккумуляторные батареи, изготавливаемые в Германии, идентифицируются девятизначным номером (ETN) согласно стандарту EN 50342. Этот номер содержит информацию о номинальном напряжении, номинальной емкости и низкотемпературном испытательном токе.

Например:
555 059 042 означает:
12 В (первая цифра кода);
55 А·ч;
специальный тип конструкции (059);
низкотемпературный испытательнй ток 420 А.

Рис. 3. Электрические параметры аккумуляторной батареи:
I_E – разрядный ток, R_i – внутреннее сопротивление, R_v – сопротивление нагрузки, U_0 – установившееся напряжение, U_k – напряжение на выводе; U_i – падение напряжения из-за внутреннего сопротивления



Рис. 4. Кривые напряжения АКБ в зависимости от времени разряда при разных разрядных токах



Емкость

Емкость – это время, в течение которого аккумуляторная батарея способна отдавать определенный ток при заданных условиях. Емкость уменьшается по мере того, как увеличивается разрядный ток и уменьшается температура электролита.

Номинальная емкость

Стандарт DIN EN 50342 определяет номинальную емкость K_{20} как заряд, который аккумуляторная батарея способна отдать в течение 20 ч до напряжения отсечки 10,5 В (1,75 В/элемент) при заданном постоянном разрядном токе I_{20} ($I_{20} = K_{20}/20$ ч) при 25 °С. Номинальная емкость аккумуляторной батареи зависит от количества используемого активного материала (масса положительных пластин, масса отрицательных пластин, электролит) и не влияет на количество пластин.

Низкотемпературный испытательный ток

Низкотемпературный испытательный ток I_{CC} (ранее I_{KP}) показывает способность аккумуляторной батареи выдавать ток при низких температурах. Согласно стандарту DIN EN 50342, напряжение на выводах аккумуляторной батареи при I_{CC} и –18 °С через 10 с после начала разряда должно составлять не менее 7,5 В (1,25 В на элемент). Более подробная информация о времени разрядки приведена в стандарте DIN EN 50342. Краткосрочное поведение аккумуляторной батареи во время разряда при I_{CC}, главным образом, определяется числом пластин, их площадью поверхности, а также промежутком между пластинами и материалом сепаратора.

Еще одной переменной, характеризующей пусковую реакцию, является внутреннее сопротивление R_i. К полностью заряженной аккумуляторной батарее (12 В) при –18°С применимо уравнение: $R_i \leq 4000/I_{CC}$ (мОм), где I_{CC} указывается в амперах. Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи и другие сопротивления в контуре стартера определяют частоту проворачивания двигателя

Типы аккумуляторных батарей

Необслуживаемые аккумуляторные батареи
Частота, с которой аккумуляторные батареи требуют обслуживания, существенно зависит от сплава, из которого состоят пластины. Аккумуляторную батарею с пластинами из сплава свинца с сурьмой (традиционные и с малым объемом обслуживания) требуется обслуживать через короткие интервалы из-за упомянутых выше недостатков. Они уже практически не используются в автомобилях.

Отрицательная пластина у не требующих обслуживания аккумуляторных батарей (гибридных) состоит из сплава свинца с кальцием (PbCa) – в некоторых вариантах с добавлением серебра, а положительная пластина изготавливается из сплава свинца с сурьмой (PbSb). Снижение количества сурьмы приводит к снижению потерь воды при зарядке вследствие уменьшения газообразования. Это приводит к увеличению интервалов обслуживания по сравнению с аккумуляторными батареями, где используется только сплав с сурьмой. Еще одним преимуществом гибридной аккумуляторной батареи является простота изготовления. Отрицательные решетчатые пластины из сплава свинца с кальцием обычно изготавливаются с помощью простой прокатки, а положительные, подверженные более интенсивным механическим нагрузкам из-за коррозии, изготавливаются из сплава с сурьмой по сложной технологии литья. Однако из-за содержания сурьмы гибридные аккумуляторные батареи редко отвечают высоким требованиям к низкому расходу воды в легковых автомобилях (менее 1 г/А·ч).

Поскольку аккумуляторная батарея из сплава свинца с сурьмой имеют отличную стойкость к глубоким циклам, они в основном используются в грузовых автомобилях и такси. Пластины аккумуляторной батареи для мотоциклов также изготавливаются из сплава свинца с сурьмой, так как частая эксплуатация в хорошую погоду и с длительными простоями зимой требует от аккумуляторнай батареи превосходной стойкости к глубоким циклам.

Полностью необслуживаемые аккумуляторные батареи
В полностью необслуживаемых аккумуляторных батареях обе пластины изготавливаются из сплава свинца с кальцием. Это позволяет увеличить срок службы аккумуляторной батареи при поездках на очень дальние расстояния. Кроме того, эти аккумуляторные батареи более стойки к длительному перезаряду. Это достигается посредством дальнейшей оптимизации пластины.

Улучшенная геометрия решетчатой структуры с улучшенной электрической проводимостью позволяет лучше использовать активный материал. Центральный язычок межэлементного соединителя обеспечивает однородную фиксацию пластин внутри корпуса аккумуляторной батарей. Эта технология позволяет делать пластины примерно на 30 % тоньше (но прочнее) и увеличить количество пластин. Это делает возможным увеличение мощности холодного пуска без ущерба для качества.

Полностью необслуживаемые аккумуляторные батареи не требуют контроля уровня электролита и обычно не дают такой возможности. Они полностью герметизируются, за исключением двух вентиляционных отверстий. Пока электрическая система автомобиля работает нормально (т.е. постоянное напряжение ограничено максимальным значением), разложение воды уменьшается до такой степени (менее 1 г/А·ч), что резервов электролита над пластинами хватает на весь срок службы батареи. Полностью необслуживаемая аккумуляторная батарея имеет еще одно преимущество – крайне низкий саморазряд. Это позволяет хранить полностью заряженную АКБ по нескольку месяцев.

Из-за низкого саморазряда все полностью необслуживаемые АКБ заполняются электролитом на заводе. Это позволяет избежать опасной утечки электролита на СТО и в дилерских центрах при его смешивании и добавлении.

Если полностью необслуживаемая аккумуляторная батарея заряжается вне автомобиля, то зарядное напряжение не должно превышать 2,3–2,4 В на один элемент, поскольку перезаряд с постоянным током или использование зарядных устройств с ваттной (*W*)характеристической кривой приводит к разложению воды (газообразование).

Современные полностью необслуживаемые АКБ имеют безопасную лабиринтную крышку с боковыми вентиляционными отверстиями, предотвращающими утечку электролита при наклоне АКБ на угол до 70°, а фритта также обеспечивает защиту внутренней части АКБ от внешних источников открытого пламени и искр. Герметизирующие пробки больше не требуются.

Для грузовых автомобилей компания Bosch предлагает аккумуляторные батареи с пластинами из сплава с серебром, имеющие преимущества полностью необслуживаемых пусковых аккумуляторных батарей для легковых автомобилей (Bosch TECMAXX). Полное отсутствие обслуживания, позволяющее экономить – что нельзя

недооценивать в грузоперевозках – сочетается с новой лабиринтной крышкой, предотвращающей утечку электролита. Использование центральной дегазации вместо дегазации через пробки означает возможность установки фритты, защищающей внутренность аккумуляторной батареи от внешних источников открытого пламени и искр.

Аккумуляторная батарея AGM

Аккумуляторные батареи AGM – батареи, у которых электролит связан ковриками из стекловолокна) хорошо зарекомендовали себя в ситуациях, когда к аккумуляторной батарее предъявляются повышенные требования. Эти батареи отличаются от батарей со свободным электролитом тем, что электролит в них связан ковриком из стекловолокна, расположенным между положительной и отрицательной пластинами вместо сепараторов.

Аккумуляторная батарея изолируется от окружающей среды клапанами (не пропускающими воздух). За счет внутренней циркуляции внутри аккумуляторной батареи кислород, появляющийся на положительном электроде из-за газообразования, снова используется, объем создаваемого водорода подавляется, и поэтому потери воды сводятся к минимуму. Эта циркуляция становится возможной благодаря образованию между положительной и отрицательной пластинами небольших каналов, через которые транспортируется кислород. Клапаны открываются только при значительном повышении давления. Поэтому герметичная батарея AGM отличается крайне низкими потерями воды и совершенно не требует обслуживания.

Эта технология имеет и другие преимущества. Коврик гибкий – это значит, что пластину можно установить под давлением. Придавливание коврика к пластинам значительно уменьшает эффект осыпания и отделения активного материала. Это обеспечивает мощность, в три раза превышающую мощность сравнимых стартерных аккумуляторных батарей. Этот тип аккумуляторной батареи также хорош тем, что в случае разрушения корпуса аккумуляторной батареи, к примеру, при ДТП, обычно электролит не вытекает, так как связан ковриком из стекловолокна. Электролит не вытекает из АКБ даже при длительном переворачивании на 180°. Благодаря пористости коврика из стекловолокна достигается большой пусковой ток холодного пуска.

Другим преимуществом батареи AGM является предотвращение стратификации электролита. Когда аккумуляторная батарея со свободным электролитом циклически заряжается и разряжается, формируется градиент плотности электролита, сверху вниз. Это происходит потому, что при зарядке аккумуляторной батареи на пластинах оказывается электролит большей плотности и в силу более высокого удельного веса опускается вниз и скапливается там, а электролит меньшей концентрации остается в верхней части гальванического элемента. Помимо всего прочего, стратификация электролита уменьшает и емкость, и срок службы аккумуляторной батареи. Стратификация электролита происходит в разной степени во всех АКБ со свободным электролитом. Однако в батареях AGM стратификация электролита предотвращается благодаря его впитыванию ковриками из стекловолокна.

При выборе места установки батареи AGM необходимо избегать высоких температур, поскольку тепловая емкость у нее меньше, чем у аккумуляторной батареи со свободным электролитом.

Аккумуляторные батареи, стойкие к глубокому разряду

В силу своей конструкции (тонкие пластины, легкие сепараторы) пусковые аккумуляторные батареи меньше подходят для работы с частым глубоким разрядом – он вызывает интенсивный износ положительных пластин (в основном из-за отделения и осаждения активного материала). У аккумуляторных батарей, стойких к глубокому разряду, имеются сепараторы со стеклянными ковриками, поддерживающими относительно толстые пластины с положительным материалом и поэтому предотвращающие преждевременное осыпание пластин. Срок службы приблизительно в два раза превышает работу стандартной аккумуляторной батареи. Стартерные аккумуляторные батареи, стойкие к глубокому разряду с карманными сепараторами и нетканой обшивкой, имеют еще более длительный срок службы.

Виброустойчивые аккумуляторные батареи

У виброустойчивой аккумуляторной батареи блок пластин крепится к корпусу аккумуляторной батареи с помощью герметизирующей смолы или пластмассы во избежание перемещения этих двух компонентов относительно друг друга. Согласно DIN EN 50342-1, этот тип аккумуляторной батареи должен пройти 20-часовое испытание на синусоидальную вибрацию (при частоте 30 Гц) и должен выдерживать ускорение до 6 *g*. Поэтому требования к ним примерно в 10 раз выше, чем к стандартным аккумуляторным батареям. Виброустойчивые аккумуляторные батареи используются в основном в грузовиках, строительных машинах и тягачах.

Аккумуляторные батареи повышенной надежности

Сочетают в себе характерные признаки виброустойчивых батарей и батарей глубокого разряда. Они используются в грузовиках, подвергающихся экстремальной вибрации, а также там, где обычным делом является циклический разряд.

Аккумуляторные батареи с увеличенным током

По конструкции этот тип аккумуляторных батарей схож с батареями, стойкими к глубокому разряду, но пластины у них толще и количество пластин меньше. Хотя низкотемпературный испытательный ток для них не указывается, их пусковая мощность намного ниже (на 35 – 40%), чем у стартерных аккумуляторных батарей того же размера. Эти аккумуляторные батареи используются в условиях экстремальных циклических изменений работы, например, в качестве стартерных батарей.

Эксплуатация аккумуляторной батареи

Заряд

В электросистеме автомобиля аккумуляторная батарея заряжается с ограничением величины напряжения. Это соответствует методу заряда IU, где зарядный ток аккумуляторной батареи автоматически уменьшается при повышении установившегося напряжения (рис. 5). Метод зарядки IU предотвращает повреждение из-за перезаряда и обеспечивает длительный срок службы аккумуляторной батареи.

С другой стороны зарядные устройства все еще работают по принципу постоянного тока или с ваттной (W) характеристической кривой (рис. 6). В обоих случаях, по достижении полного заряда он продолжается с чуть меньшим или возможно постоянным током. Это приводит к высокому расходу воды и последующей коррозии положительной решетки.

Разряд

Сразу после начала разряда напряжение аккумуляторной батареи падает до значения, которое при продолжении разряда изменяется незначительно. Лишь незадолго до окончания разряда напряжение резко падает из-за истощения одного или нескольких активных компонентов (материала положительных пластин, материала отрицательных пластин, электролита).

Саморазряд

Со временем аккумуляторные батареи разряжаются – даже если к ним не подключена нагрузка. Современные аккумуляторные батареи с пластинами из сплава свинца с сурьмой в новом состоянии теряют около 4 – 8 % своего заряда в месяц. В процессе старения это значение может увеличиваться на 1 % и более каждый день из-за миграции сурьмы к отрицательной пластине до момента, когда аккумуляторная батарея перестает функционировать. Общее правило для влияния температуры: саморазряд удваивается на каждые 10 К увеличения температуры.

Рис. 5. Заряд аккумуляторной батареи на основе вольт-амперной характеристики IU:
1 – зарядное напряжение; 2 – зарядный ток

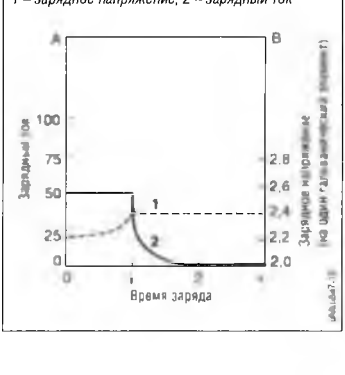
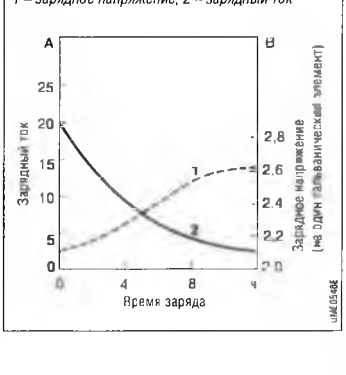


Рис. 6. Заряд аккумуляторной батареи на основе ваттной характеристики W:
1 – зарядное напряжение; 2 – зарядный ток



Аккумуляторные батареи с пластинами из сплава свинца с кальцием имеют значительно меньший саморазряд (около 3 % в месяц). Эта величина остается практически постоянной на протяжении всего срока службы.

Обслуживание аккумуляторных батарей

Во время работы аккумуляторных батарей с малым объемом технического обслуживания уровень электролита должен проверяться в соответствии с требованиями инструкции завода-изготовителя; когда это необходимо по показаниям, он должен пополняться до отметки MAX дистиллированной или деминерализованной водой. Для минимизации саморазряда аккумуляторную батарею следует хранить в чистом и сухом месте. Рекомендуется также проверять плотность электролита перед наступлением зимы или, если это невозможно, измерять напряжение аккумуляторной батареи. Она должна повторно перезаряжаться, когда плотность электролита становится ниже 1,20 г/мл или напряжение достигает значения менее 12,2 В. Клеммы, контактные зажимы и установочные крепления должны быть покрыты кислото-защитной пластичной смазкой.

Аккумуляторные батареи, временно удаляемые из автомобиля на обслуживание, должны храниться в прохладном, сухом месте. Плотность электролита должна проверяться каждые 3-4 месяца. Аккумуляторная батарея должна повторно перезаряжаться, когда плотность электролита становится ниже 1,20 г/мл или напряжение достигает значения менее 12,2 В. Аккумуляторные батареи, требующие мало обслуживания и необслуживаемые аккумуляторные батареи лучше всего перезаряжать по методу IU при максимальном напряжении 14,4 В. Этот метод обеспечивает адекватное время заряда порядка 24 часов без риска перезаряда. При использовании зарядного устройства с постоянным током или ваттной (W) характеристикой при первых же признаках газовыделения ток (в амперах) должен быть уменьшен до максимум 1/10 номинальной емкости аккумуляторной батареи, т.е. до значения 6,6 А у аккумуляторной батареи емкостью 66 А·ч. Зарядное устройство должно быть отключено примерно через один час после этого. Помещение, где производится зарядка, должно хорошо проветриваться (кислородно-водородный газ вызывает риск взрыва, запрещается наличие открытого пламени и искр). Работать необходимо в защитных перчатках.

Неисправности аккумуляторных батарей

Повреждения или неисправности аккумуляторных батарей, которые в конечном счете приводят к отказам (короткое замыкание, сопровождающееся износом сепараторов или потерей активной массы, разрушение соединения между гальваническими элементами и пластинами), редко могут быть восстановлены ремонтом. Аккумуляторную батарею необходимо заменить. Внутренние короткие замыкания распознаются по сильно разнящейся плотности электролита в отдельных элементах (разность между минимальной и максимальной плотностью > 0,03 г/мл). При возникновении обрывов цепи в соединителях гальванических элементов аккумуляторной батареи зачастую может отдавать небольшой ток и может заряжаться, но даже у полностью заряженной аккумуляторной батареи при попытке завести двигатель напряжение упадет.

Если в аккумуляторной батарее нет неисправностей, но она устойчиво теряет заряд (признаки: низкая плотность электролита во всех гальванических элементах, отсутствие пусковой мощности) или перезаряжается (признаки: большая потеря воды), это говорит о неисправности электрооборудования (неисправен генератор, электрооборудование остается включенным после выключения двигателя из-за неисправности, к примеру, реле, регулятором напряжения выбрано слишком маленькое или слишком большое значение, либо он вообще вышел из строя). В батареях, подвергающихся глубокому разряду в течение длительного времени, образующийся при разряде мелкокристаллический сульфат свинца может превратиться в крупнокристаллический, что усложняет заряд аккумуляторной батареи.

Список литературы

[1] DIN EN 50342-1: Lead-acid starter batteries – Part 1: General requirements and methods of test; German version EN 50342-1.

[2] DIN EN 50342-2: Lead-acid starter batteries – Part 2: Dimensions of batteries and marking of terminals; German version EN 50342-2.

[3] DIN EN 50342-4: Lead-acid starter batteries – Part 4: Dimensions of batteries for heavy vehicles; German version EN 50342-4.

Электрические двигатели

Систематика роторных электрических машин

Электрические машины [7, 8] являются электро-магнето-механическими преобразователями энергии. При энергии W_m, имеющейся в магнитном поле, разряд, согласно углу вращения γ, создает магнитную силу F_t:

$$F_t = \frac{dW_m}{d\gamma}.$$

Она служит тангенциальной силой для создания крутящего момента, вычисляемого по радиусу ротора r (рис. 1). Это можно описать выражением:

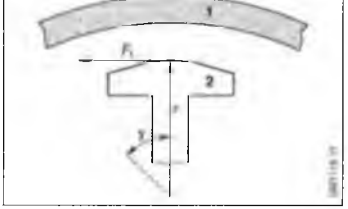
$$M = F_t r.$$

Электрические машины можно поделить на категории по их управлению (табл. 1). Часть этой систематизации взята из стандарта DIN 42027 [1].

Таблица 1. Систематический подход к электрическим двигателям

Самокоммутируемые двигатели (коллекторные двигатели)	
Двигатель переменного тока (универсальный двигатель)	Двигатели постоянного тока: – с последовательным возбуждением; – с параллельным возбуждением
Двигатели с внешней коммутацией (частотно-коммутируемые двигатели)	
Асинхронные двигатели	Синхронные двигатели

Рис. 1. Принцип работы роторных электрических машин:
1 – статор; 2 – ротор; r – радиус ротора; F_t – тангенциальная сила, γ – угол закручивания



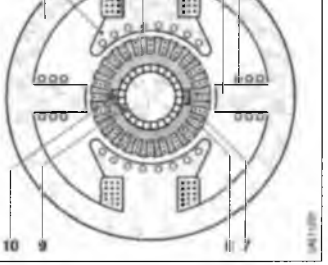
Двигатели постоянного тока

Для работы в качестве двигателей часто выбираются двигатели постоянного тока. Они используются, например, в качестве приводов для электрических топливных насосов, вентиляторных электродвигателей, пусковых электродвигателей, электродвигателей стеклоочистителей ветрового стекла и стеклоподъемников.

Двигатель постоянного тока (рис. 2) состоит из статора с возбуждающей, компенсирующей и коллекторной обмотками, а также ротора (якоря) с роторной обмоткой. Ротор запитывается через коллекторные щетки и коллекторные пластины. Обмотки можно соединять параллельно или последовательно.

Двигатели постоянного тока классифицируются по различным характеристикам (с последовательным или параллельным возбуждением). Приведенные вычисления относятся к самокоммутирующимся двигателям. Схемы соединений двигателей постоянного тока регламентируются стандартом DIN EN 60034, часть 8 [2].

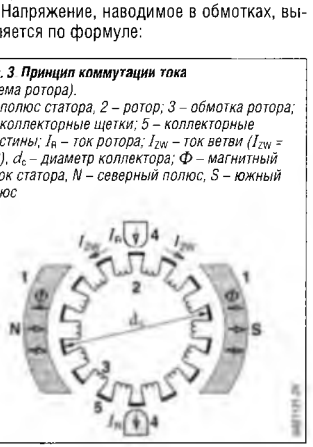
Рис. 2. Структура двухполюсного электродвигателя переменного тока (поперечное сечение):
1 – статор; 2 – полюс возбуждения; 3 – обмотка возбуждения; 4 – компенсирующая обмотка (предпочтительна на двигателях с более высокой выходной мощностью); 5 – коммутирующий полюс; 6 – коммутирующая обмотка; 7 – ротор; 8 – обмотка ротора; 9 – коллекторные пластины, 10 – коллекторная щетка (положение в нейтральной зоне)



Коммутация

Для работы двигателя постоянного тока необходимо, чтобы направление тока в роторе оставалось постоянным относительно полюсов статора (рис. 3). Процесс изменения направления тока в роторе происходит в нейтральной зоне и называется коммутацией. Коммутатор получает ток I_R через коллекторные щетки. Он делится на токи ветвей I_{ZW}. Напряжение, наводимое в обмотках, вычисляется по формуле:

Рис. 3. Принцип коммутации тока
(Схема ротора).
1 – полюс статора, 2 – ротор; 3 – обмотка ротора; 4 – коллекторные щетки; 5 – коллекторные пластины; I_R – ток ротора; I_{ZW} – ток ветви ($I_{ZW} = I_R/2$), d_c – диаметр коллектора; Φ – магнитный поток статора, N – северный полюс, S – южный полюс



$$u = -L \frac{di}{dt}.$$

Тангенциальная скорость v_t поверхности коллектора:

$$v_t = \omega \frac{d_c}{2}.$$

Для определения длительности цикла T_c учитывается количество коллекторных пластин:

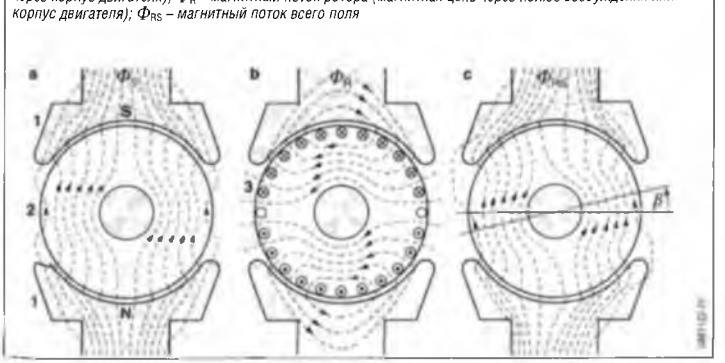
$$T_c = \frac{\pi d_c}{v_t K}.$$

Изменение тока в коллекторной обмотке происходит за время T_c. Если учесть, что имеет место лишь ток I_{ZW}, то для наведенного напряжения применяется следующее:

$$u = -L \frac{I_{ZW} K v_t}{\pi d_c}.$$

Обозначения берутся из DIN 1304, часть 7 [3].

Рис. 4. Наложение полей:
a – основное поле: ток возбуждения включен, ток ротора выключен; b – поле квадратичной оси якоря: ток возбуждения выключен, ток ротора включен; c – полное поле: наложение основного поля и поля квадратичной оси якоря; магнитная нейтральная зона отклоняется на угол β, 1 – полюс возбуждения (полюс статора, главный); 2 – ротор; 3 – обмотка ротора, Φ_S – магнитный поток статора (магнитная цепь через корпус двигателя); Φ_R – магнитный поток ротора (магнитная цепь через полюс возбуждения или корпус двигателя); Φ_{RS} – магнитный поток всего поля

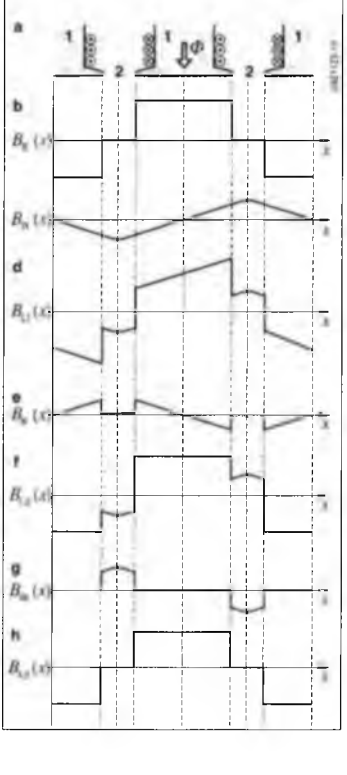


Коммутирующая и компенсирующая обмотки

Распределение поля

Главное поле, беспрепятственно проникающее в ротор при отсутствии тока, имеет симметричное распределение (рис. 4, a). Аналогично, имеется симметричное разделение потока, когда ток подается только на ротор (рис. 4, b).

Рис. 5. Эффект компенсирующей и коммутирующей обмоток:
a – расположение полюсов,
b – распределение поля возбуждения $B_E(x)$;
c – распределение поперечного поля ротора $B_R(x)$,
d – наложение $B_E(x)$ и $B_R(x)$,
e – компенсирующая индукция $B_K(x)$;
f – наложение $B_E(x)$, $B_K(x)$ и $B_R(x)$,
e – коммутирующая индукция $B_W(x)$;
h – наложение всех распределений полей,
1 – полюсный башмак; 2 – нейтральная зона;
Φ – магнитный поток статора



При наложении этих полей нейтральная зона отклоняется на угол β (рис. 4, c). Таким образом, эта магнитно-нейтральная зона больше не соответствует геометрически нейтральной зоне (положение коллекторных щеток).

В геометрически нейтральной зоне это создает магнитное поле, которое в процессе коммутации наводит напряжение в обмотке ротора, вызывая искрение между щеткой и движущейся коллекторной пластиной. Во избежание этого в процессе коммутации в этой обмотке наводится другое напряжение, где амплитуда и направление компенсируют эффект изначально наведенного напряжения. Это достигается с помощью коммутирующей обмотки (рис. 2). Коммутирующая обмотка последовательно подключается к обмотке ротора. Она использует обратную реакцию ротора для противодействия смещению в магнитно-нейтральной зоне.

В случае с двигателями без коммутирующей обмотки щетки нужно смещать в магнитно-нейтральную зону.

Возмущение основного поля, возникающее в области полюсного башмака, ведет к снижению доступной поверхности клеммы вкупе с ростом магнитного сопротивления. Вот почему у более крупных двигателей имеется компенсирующая обмотка, встроенная к полюсный башмак (рис. 2). Компенсирующая обмотка последовательно соединяется с обмоткой ротора, и ее размеры таковы, чтобы компенсировать поперечное поле ротора.

Эффект коммутирующей и компенсирующей обмоток

Последовательность изображений на рис. 5 описывает эффект обеих обмоток. Показаны распределения полей в воздушном зазоре. Расположение полюсов с обмоткой и нейтральной зоной показано на рис. 5, a. Распределение поля возбуждения $B_E(x)$ под полюсным башмаком, а также полюсное деление τ_P показаны на рис. 5, b. На рис. 5, c показано распределение поперечного поля ротора $B_R(x)$. Наложение обоих распределений полей можно увидеть на рис. 5, d. Компенсирующая индукция $B_K(x)$ (рис. 5, e) и наложение из рис. 5d показаны на рис. 5, f. Если коммутирующая индукция $B_W(x)$ на рис. 5g накладывается на распределение поля из рис. 5, f, то получаем желаемое распределение поля согласно рис. 5h.

Расчет тангенциальной силы

Для создания крутящего момента на роторе необходима тангенциальная сила. Объекты

исследования – статор и ротор с канавкой (рис. 6), в которой находится токоведущий проводник (прядь обмотки). Ротор перемещается из положения 1 в положение 2. Поток статора Φ_S создает индукцию B_S в воздушном зазоре, а проводник в роторе, через который протекает ток, вызывает индукцию B_R. С левой стороны канавки образуется деструктивное, а с правой стороны - конструктивное наложение этих двух индукций. Энергия, накопленная в воздушном зазоре с левой стороны канавки, равна:

$$dW_2 = \frac{\delta l_L}{2\mu_0}\cdot(B_S^2 - B_R^2)dx \qquad \text{(уравнение 1).}$$

С правой стороны канавки она равна:

$$dW_1 = \frac{\delta l_L}{2\mu_0}\cdot(B_S^2 + B_R^2)dx \qquad \text{(уравнение 2).}$$

Работа dW, выполняемая в этой части, получается из разности между энергиями dW_1 и dW_2.

$$dW = dW_2 - dW_1 = F_t dx \qquad \text{(уравнение 3).}$$

Уравнения 1, 2 и 3 можно использовать для вычисления силы F_t. Это можно описать выражением:

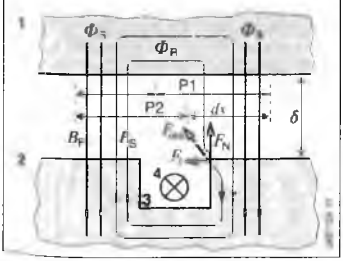
$$F_t dx = \frac{l_R \delta}{2\mu_0}\left[(B_S^2 - B_R^2) - (B_S^2 + B_R^2)\right]dx .$$

Это значит, что:

$$F_t = \frac{l_R \delta}{\mu_0} B_R^2$$

Магнитно-эффективная длина ротора равна l_R. Сила F_t - это квадратичная функция индукции провода, по которому протекает ток. Влияния индукции статора компенсируют друг друга. Поскольку силы на пограничных слоях всегда воздействуют в направлении низкой проницаемости, то они влияют на крутящий момент из-за потоков, возникающих по бокам от канавки.

Рис. 6 Расположение статора и ротора
1 – статор; 2 – ротор; 3 – канавка; 4 – проводник, через который протекает ток; Φ_S – поток статора; Φ_R поток ротора; δ – воздушный зазор, B_S – индукция потока статора; B_R – индукция потока ротора; F_t – тангенциальная сила; F_N – нормальная сила; F_{res} – результирующая сила; P1 – положение 1; P2 – положение 2



Электродвигатель параллельного возбуждения

Особенностью электродвигателя параллельного возбуждения является то, что обмотка ротора параллельно соединяется с обмоткой возбуждения. Для электродвигателя параллельного возбуждения действуют следующие условия подключения (рис. 7):
- A – обмотка ротора;
- A – коммутирующая обмотка;
- C – Компенсирующая обмотка;
- E – обмотка возбуждения.

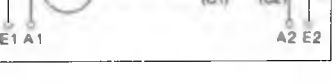
Расчет электродвигателя параллельного возбуждения базируется на сопротивлении ротора R_A и напряжении, наводимом обмоткой ротора. Напряжение на клеммах U_{KL} составляется из напряжения ротора $U_A = I_A R_A$ и наведенного напряжения $U_{ind} = c_1 n \Phi_S$:

$$U_{KL} = I_A R_A + c_1 n \Phi_S \qquad \text{(уравнение 4).}$$

Здесь c_1 обозначает конструктивно определяемую константу двигателя, зависящую от количества катушек в обмотке ротора, n – частота вращения, Φ_S – поток статора, I_A – ток ротора.

Решение уравнения 4 для n дает скорость вращения (уравнение частоты вращения – тока ротора):

Рис. 7 Обозначение подключений электродвигателя с параллельным возбуждением
A – обмотка ротора; B – коммутирующая обмотка; C – компенсирующая обмотка; E – обмотка возбуждения, M – двигатель



$$n = -\frac{R_A}{c_1 \Phi_s} I_A + \frac{U_{KL}}{c_1 \Phi_s} \quad \text{(уравнение 5)}$$

Если момент двигателя

$$M_M = c_2 \Phi_S I_A$$

вставить в уравнение частоты вращения – тока ротора (Уравнение 5), то получим уравнение частоты вращения – крутящего момента

$$n = -\frac{R_A}{c_1 c_2 \Phi_S^2} M_M + \frac{U_{KL}}{c_1 \Phi_S} \quad \text{(уравнение 6)}$$

c_2 – это тоже конструктивно определяемая константа двигателя, зависящая от количества катушек в обмотке ротора.

На рис. 8 показаны рабочие характеристики электродвигателя параллельного возбуждения. Для преодоления трения двигатель должен развивать фрикционный момент M_R. В момент включения частоты вращения равна нулю. Это позволяет вычислить пусковой момент

$$M_A = \frac{U_{KL} c_2 \Phi_S}{R_A}$$

в уравнении 6. При теоретически самой высокой частоте вращения на характеристической кривой (холостые обороты), двигатель не развивает крутящий момент. Холостые обороты n_0 равны

$$n_0 = \frac{U_{KL}}{c_1 \Phi}.$$

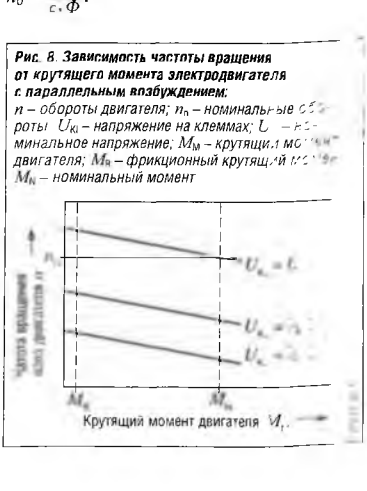


Рис. 8. Зависимость частоты вращения от крутящего момента электродвигателя с параллельным возбуждением:
n – обороты двигателя; n_n – номинальные обороты U_{KL} – напряжение на клеммах; U – номинальное напряжение; M_M – крутящий момент двигателя; M_R – фрикционный крутящий момент M_N – номинальный момент

Электродвигатель с последовательным возбуждением

У электродвигателя с последовательным возбуждением коммутирующая, компенсирующая, возбуждающая обмотки статора и обмотка ротора соединяются последовательно (рис. 9). D обозначает обмотку возбуждения электродвигателя с последовательным возбуждением. Чтобы определить рабочие характеристики, суммируем сопротивления обмоток, и получаем сопротивление R_A.

Точно таким же образом, как и в случае с электродвигателем параллельного возбуждения, напряжение на клеммах U_{KL} складывается из напряжения ротора и наведенного напряжения:

$$U_{KL} = I_A R_A + c_1 n \Phi_S \quad \text{(уравнение 7)}.$$

В результате получаем уравнение скорости вращения:

$$n = -\frac{R_A}{c_1 \Phi} I_A + \frac{U_{KL}}{c_1 \Phi} \quad \text{(уравнение 8)}.$$

Магнитный поток можно вычислить с помощью другой константы двигателя c_3:

$$\Phi = c_3 I_A \quad \text{(уравнение 9)}.$$

Константа двигателя c_3 имеет единицу индуктивности и поэтому зависит от геометрии, количества катушек и проницаемости. Крутящий момент двигателя M_M вычисляется по формуле

$$M_M = c_2 c_3 I_A^2 \quad \text{(уравнение 10)}.$$

Если уравнение 10 скорректировать согласно I_A, это выражение будет действительно в уравнении 9 и оно, в свою очередь, в уравнении частоты вращения – тока (уравнение 8). В результате получаем:

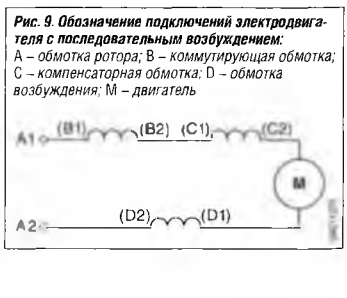


Рис. 9. Обозначение подключений электродвигателя с последовательным возбуждением:
A – обмотка ротора; B – коммутирующая обмотка; C – компенсаторная обмотка; D – обмотка возбуждения; M – двигатель

$$n = -\frac{R_A}{c_1 c_3} + \frac{U_{KL}\sqrt{c_2 c_3}}{c_1 c_3}\frac{1}{\sqrt{M_M}}$$ (уравнение 11).

В отличие от электродвигателя с параллельным возбуждением, здесь частота вращения пропорциональна соответствующему значению корня крутящего момента (рис. 10). Двигатель характеризуется значительным падением частоты вращения при малой нагрузке. Если внешняя нагрузка на двигатель будет равна нулю, то частота вращения теоретически будет стремиться к бесконечности.

Рис. 10. Зависимость частоты вращения от крутящего момента электродвигателя с последовательным возбуждением:
n – обороты двигателя; n_n – номинальные обороты; U_{KL} – напряжение на клеммах; U_N – номинальное напряжение, M_M – крутящий момент двигателя; M_R – фрикционный крутящий момент; M_N – номинальный момент

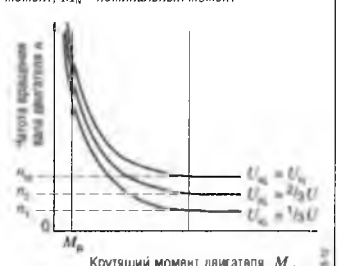
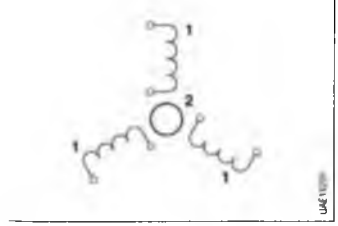


Рис. 11. Принцип работы асинхронного двигателя:
1 – обмотка статора; 2 – ротор; ось вращения вертикальна относительно плоскости чертежа



Асинхронный электродвигатель

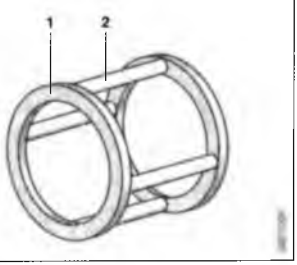
Асинхронный электродвигатель – основной привод, используемый в промышленности. К примеру, в автомобилестроении он используется в электроусилителях рулевого управления и в гибридных автомобилях. В следующем разделе представлена концепция работы асинхронного двигателя как индукционной машины. Приведен также энергетический анализ асинхронного двигателя в силу его явного преобладания среди приводов.

Общее устройство

Различают двигатели с внешним ротором и внутренним ротором. У двигателей с внешним ротором статор находится внутри ротора; У двигателей с внутренним ротором наоборот – ротор находится внутри статора. На принципиальной схеме (рис. 11) показана принципиальная схема асинхронного двигателя с внутренним ротором.

Ротор состоит из короткозамкнутого каркаса с пакетом пластин (рис. 12, в качестве примера с четырьмя короткозамкнутыми стержнями). Пакет пластин полностью заполняет пространство короткозамкнутого каркаса (на рис. не показано). Он состоит из отдельных стальных листов, изолированных друг от друга, чтобы свести к минимуму потери вихревых токов.

Рис. 12. Короткозамкнутая клетка асинхронного электродвигателя:
1 – короткозамкнутое кольцо;
2 – короткозамкнутый стержень



Рабочие характеристики

Обмотка статора создает вращающееся поле с трехфазным переменным током. Между скоростью вращающегося поля и скоростью ротора возникает разница, создающая индукцию магнитно-эффективного тока в роторе, которая в свою очередь способствует созданию крутящего момента.

Физический принцип работы основан на законе магнитной индукции. На рис. 13 изображен ротор в виде упрощенного проводящего контура на вращающихся креплениях. Относительное перемещение между статором и ротором описывает угловая частота ω_S. Магнитное поле B_E с угловой частотой, окружающее контур ротора, наводит напряжение в короткозамкнутом роторе в соответствии со вторым уравнением Максвелла [4, 5, 6]:

$$\oint \vec{E} d\vec{s} = -d/dt \iint B_E \, dA \qquad \text{(уравнение 12)}.$$

На основании этого уравнения и конструктивных переменных двигателя (см. рис. 13) получаем:

$$2\vec{E}(l+2r)\vec{n} = 2lr\hat{B}_E\omega\sin(\omega t) \quad \text{(уравнение 13)},$$

где $E = I \cdot A_{nom}/\kappa$ (κ – удельная электропроводность), напряжение создает магнитно-эффективную мощность

$$i = \frac{\kappa A_{nom} lr\hat{B}_E\omega_S}{(l+r)}\sin(\omega_S t) \qquad \text{(уравнение 14)}$$

в проводящем контуре, магнитное поле которого

Рис. 13. Двухполосный короткозамкнутый ротор: *1 – короткозамкнутая полоса; 2 – короткозамкнутая перемычка; B_E – плотность магнитного потока вращающегося поля статора; i – наведенный ток; l – длина короткозамкнутой полосы; r – радиус ротора; A_{nom} – поперечное сечение полосы; ω_S – угловая частота (получается из относительного перемещения между вращающимся полем статора и скоростью вращения ротора)*



$$H_{ind} = \frac{iN}{l_{Fe}}$$

и плотность потока (магнитная индукция)

$$B_{ind} = \mu H_{ind}$$

ослабляет исходное вращающееся поле B_E (индуктивное сопротивление). Нижеследующее уравнение применимо для получения результирующей магнитно индукции:

$$B_R = B_E - B_{ind}\ .$$

В уравнении Максвелла (уравнение 13) вместо B_E остается результирующая магнитная индукция B_R. На проводящий контур воздействует тангенциальная сила F_t:

$$F_t = il\hat{B}_R\sin(\omega_S t) \qquad \text{(уравнение 15)}$$

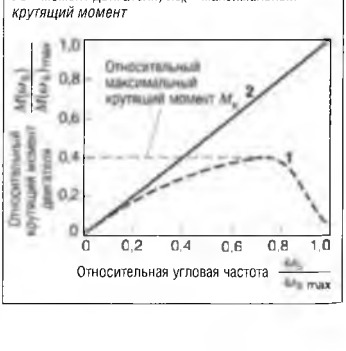
(сила Лоренца). Она используется для вычисления крутящего момента. Для уравнений 14 и 15 справедливо следующее:

$$M = 2F_t r$$

$$= \frac{2\kappa A_{nom}\omega_S}{(l+2r)}[lr\hat{B}_R\sin(\omega_S t)]^2$$

На рис. 14 показаны две характеристические кривые. Одна из них отображает крутящий момент под влиянием индуктивного сопро-

Рис. 14. Распределение крутящего момента асинхронного двигателя: *1 – распределение под влиянием индуктивного сопротивления; 2 – распределение без влияния индуктивного сопротивления; ω_S – угловая частота; ω_{Smax} – максимально возможная угловая частота; ω_K – максимальная угловая частота; M – момент двигателя; M_K – максимальный крутящий момент*



тивления. На него может повлиять геометрия вала ротора и выбор материалов. Другая кривая отображает крутящий момент без влияния индуктивного сопротивления. Это ограниченный случай для технической реализации.

При увеличении угловой частоты индуктивное сопротивление сначала приводит к увеличению крутящего момента вплоть до достижения переломного момента. Это максимально возможный крутящий момент двигателя. Впоследствии он падает из-за увеличивающегося влияния индуктивного сопротивления. Рассеяние мощности P_V, возникающее в проводящем контуре, вычисляется на основе сопротивления проводящего контура R_S и тока, наведенного в контуре i_S:

$$P_V = R_S \cdot i_S^2 .$$

Таким образом, рассеяние мощности растет пропорционально квадрату наведенного тока.

Классы эффективности

CEMEP Европейский Комитет изготовителей электродвигателей и силовой электроники) ввел классификацию эффективности на базе трех классов (EFF1, EFF2 и EFF3). Классы эффективности применяются к трехфазным асинхронным двигателям с двумя и четырьмя полюсами, а также с выходной мощностью от 1,1 до 90 кВт (рис. 15).

Рис. 15. Эффективность и выходная мощность
Необходимая эффективность для:
1 – EFF1 (небольшие различия между двух- и четырехполюсными двигателями, не видимые в показанном масштабе);
2 – EFF2 (двух- и четырехполюсные двигатели),
3 – EFF3 (двух- и четырехполюсные двигатели). Нелинейное приложение номинальной мощности, более сильный разброс в нижнем диапазоне выходной мощности



Синхронный электродвигатель

Синхронные электродвигатели используются, в основном, в качестве генераторов переменного тока с клювообразными полюсами. В качестве электродвигателей они используются, например, в электроусилителях руля, в электроприводах гибридных автомобилей и в электроприводах турбонагнетателей.

Общее устройство

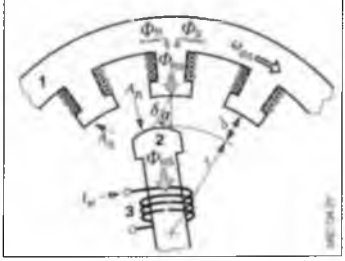
В отличие от асинхронного двигателя, в синхронном ротор вращается синхронно с полем возбуждения с угловой скоростью $\omega_{\Phi S}$. Магнитный поток Φ_R, создаваемый обмоткой ротора, и магнитный поток статора Φ_S накладываются друг на друга относительно результирующего магнитного потока Φ_{RS} (рис. 16):

$$\Phi_{RS} = \Phi_R + \Phi_S .$$

Поскольку ротор и статор работают намного ниже уровня магнитного насыщения ($\mu_r \to \infty$), воздушный зазор δ между ротором и статором, а также угол α определяют сопротивление магнитной цепи R_m:

$$R_m = 2\,\frac{\delta}{\mu_0 A_R} = 2\frac{d}{\mu_0 A_R \cos\alpha} \quad \text{(уравнение 16).}$$

Рис. 16. Базовая конструкция синхронного двигателя:
1 – статор, 2 – ротор; 3 – обмотка ротора с количеством катушек N; Φ_S – магнитный поток статора; Φ_R – магнитный поток ротора; Φ_{RS} – наложение потоков, $\omega_{\Phi S}$ – угловая скорость поля возбуждения; I_e – ток возбуждения в роторе; A_S – магнитно-эффективная поверхность статора; A_R – магнитно-эффективная поверхность ротора; r – радиус ротора, d – расстояние между ротором и статором; δ – величина воздушного зазора; α – угол отклонения



Коэффициент 2 используется потому, что между ротором и статором имеются два зазора. Если электродвигатель выдает крутящий момент, то ротор вращается с углом α из положения холостого хода (рис. 17).

Результирующий магнитный поток Φ_{RS} рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{RS} = \frac{\Theta_{er}}{R_m} + \Phi_S .$$

При R_m из уравнения 16 имеем:

$$\Phi_{RS} = \frac{\Theta_{er}\mu_0 A_R \cos\alpha + 2d\Phi_S}{2d}$$

При $\Theta_{er} = NI_{er}$ получаем:

$$\Phi_{RS} = \frac{NI_{er}\mu_0 A_R \cos\alpha + 2d\Phi_S}{2d} \quad \text{(уравнение 17)}.$$

Θ_{er} – это магнитное «захлебывание» ротора, а I_{er} – ток возбуждения, подаваемый на ротор через контактные кольца. Влияющая на крутящий момент тангенциальная сила F_t вычисляется по формуле полюсной силы Максвелла:

$$F_t = \frac{\Phi_{RS}^2}{\mu_0 A_R}\sin\alpha \quad \text{(уравнение 18)}$$

[4, 5, 6]. Тангенциальная сила используется для вычисления крутящего момента двигателя M_M:

$$M_M = 2F_t r \quad \text{(уравнение 19)}.$$

Уравнение 17 вставляется в уравнение 18 и результат в уравнении 19 дает следующую зависимость:

$$M_M = -\frac{r\sin\alpha}{2\mu_0 A_R d^2}\cdot[(N I_{er}\mu_0 A_R\cos\alpha)^2 + 4N I_{er}\mu_0 A_R d\Phi_S\cos\alpha + 4d^2\Phi_S^2)] .$$

Первый член зависит только от тока возбуждения I_{er} и соответствует моменту от зубцовых гармонических помех поля. Второй член создает момент двигателя в решающей степени. Здесь можно увидеть линейную зависимость «захлебывания» ротора $\Theta = I_{er}N$ и магнитного потока статора Φ_S. Третий член также создает крутящий момент и зависит лишь от магнитного потока статора.

Рост внешнего нагружающего момента приводит к увеличению угла нагрузки α и, стало быть, к изменению момента двигателя M_M (рис. 18). Максимальный создаваемый двигателем момент обозначается как M_K в положении α_K. При превышении α_K электродвигатель «буксует».

Рабочие характеристики

Схема синхронного двигателя может быть выполнена в виде однофазной эквивалентной электрической схемы, где источником напряжения считается напряжение, индуцируемое ротором в статоре (напряжение на полюсном колесе U_P), а остаточные индуктивные сопротивления складываются, образуя синхронное сопротивление X_S (рис. 19). Напряжение сверх синхронного сопротивления обозначается как U_S, а напряжение на клеммах – U_0. Направление тока указывается в соответствии с системой стрелок для устройств-потребителей. В то время как при работе двигателя ток течет к потребителям, при работе генератора он течет от генератора. Составив сеточное уравнение, получаем ток I

Рис. 17. Силы на роторе:
1 – обмотка, 2 – ротор; 3 – обмотка ротора, F_t – тангенциальная сила, F_N – нормальная сила, α – угол отклонения

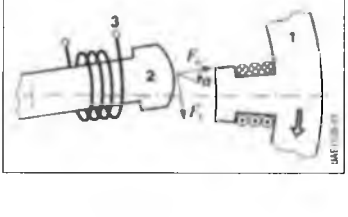


Рис. 18. Кривая момента и угла отклонения:
M_K – максимальный момент, α_K – отклонение при достижении максимального момента



$$I = \frac{U_0 - U_P}{X_S} \qquad \text{(уравнение 20).}$$

На напряжение на полюсном колесе влияет ток возбуждения. Формулы выводятся ниже. Имеем:

$$U_P = -\frac{d\Phi_R}{dt}$$

При косинусоидальном магнитном потоке Φ_R и

$$\Phi_R = B A_S ,$$

включая его временное дифференцирование, получаем:

$$u_P = \Phi_R \omega_{\Phi S} \sin(\omega_{\Phi S} t)$$
$$= B_R A_S \omega_{\Phi S} \sin(\omega_{\Phi S} t)$$
$$= \mu H_R A_S \omega_{\Phi S} \sin(\omega_{\Phi S} t) .$$

Интенсивность создаваемого в роторе магнитного поля описывается законом Ампера. Напряжение на полюсном колесе:

$$u_P = \mu \frac{\omega_R}{2\delta} A_S \omega_{\Phi S} \sin(\omega_{\Phi S} t)$$
$$= I_{er} \frac{\mu N}{2\delta} A_S \omega_{\Phi S} \sin(\omega_{\Phi S} t)$$
$$= u_P \sin(\omega_{\Phi S} t)$$

в этом случае будет линейно зависимым от тока возбуждения I_{er}. Временно изменяемое напряжение на полюсном колесе преобразуется в эффективное по формуле:

$$U_P = \frac{\hat{u}_P}{\sqrt{2}} .$$

Рис. 19. Однофазная эквивалентная электрическая схема синхронного электродвигателя:
U_P – напряжение на полюсном колесе; U_S – реактивное напряжение; U_0 – напряжение на клеммах; I – ток



На базе сеточного уравнения (уравнение 20) можно вывести три рабочих состояния синхронного двигателя в зависимости от напряжения на полюсном колесе (рис. 20):
случай 1: $U_P < U_0$, недостаточное возбуждение, индуктивное поведение;
случай 2: $U_P = U_0$, работа вхолостую;
случай 3: $U_P > U_0$, избыточное возбуждение, как конденсатор.

Первый случай имеет место, пока $U_P < U_0$. Если $I_{er} = 0$, то в качестве наведенного напряжения принимается лишь самонаводящееся напряжение. Если на ротор подается ток, то действует вызываемая ротором взаимная индукция. Первый случай называется недостаточным возбуждением. Ток отстает от напряжения на 90° ($\varphi(I,U) < 0$). Синхронный двигатель демонстрирует индуктивные характеристики.

Дальнейшее повышение тока возбуждения приводит к $U_P = U_0$. В результате получаем второй случай (работа вхолостую). Ток I_1 становится равен нулю, если через синхронное сопротивление больше не подается напряжение.
Дальнейшее повышение тока возбуждения при $U_P > U_0$ приводит к третьему случаю (избыточное возбуждение).

Рис. 20. Рабочие состояния синхронного двигателя:
a – недостаточное возбуждение (индуктивное), b – работа вхолостую, c – перевозбуждение (как конденсатор); U_P – напряжение на полюсном колесе, U_S – реактивное напряжение; U_0 – напряжение на клеммах; I_1 – ток статора



Все три случая относятся к работе двигателя и генератора. Для однофазной эквивалентной электрической схемы напряжение и ток обозначаются стрелками. Кроме того, определяется нагрузочный угол β между напряжениями U_0 и U_S. Для работы двигателя нагрузочный угол $\beta < 0$ (рис. 21, a). Треугольник напряжений замыкается напряжением U_S.

Синхронное сопротивление означает, что протекает ток I_s, опережающий на 90° напряжение U_S. Он разбивается на следующие компоненты: активный ток I_W и реактивный ток I_B (рис. 21, a).

Если напряжение на полюсном колесе уменьшить так, чтобы стрелка реактивного напряжения находилась вертикально на стрелке напряжения на клеммах U_0, то двигатель будет лишь потреблять активный ток (рис. 21, b).

Дальнейшее снижение напряжения на полюсном колесе приводит к недостаточному возбуждению. Ток I_1 отстает от напряжения U_S на 90°, что равноценно индуктивным характеристикам двигателя (рис. 21, c).

При приложении к двигателю крутящего момента, он переходит в режим генератора. Работа в режиме генератора отличается положительным нагрузочным углом β (рис. 22). Знак тока становится отрицательным. Ток оттекает от электродвигателя. В случае перевозбуждения электродвигатель ведет себя как конденсатор. Он выдает реактивную мощность (рис. 22, a).

Если напряжение на полюсном колесе уменьшить так, чтобы стрелка реактивного напряжения U_S находилась вертикально на стрелке напряжения на клеммах, то двигатель будет лишь выдавать активный ток (рис. 22, b).

Рис. 21. Рабочие характеристики синхронного двигателя, работающего в режиме двигателя:
a – перевозбуждение, b – работа в качестве двигателя с потреблением активного тока; c – недостаточное возбуждение; U_0 – напряжение на клеммах; U_S – реактивное напряжение; U_P – напряжение на полюсном колесе; I – ток; I_W – активный ток; I_B – реактивный ток, β – нагрузочный угол

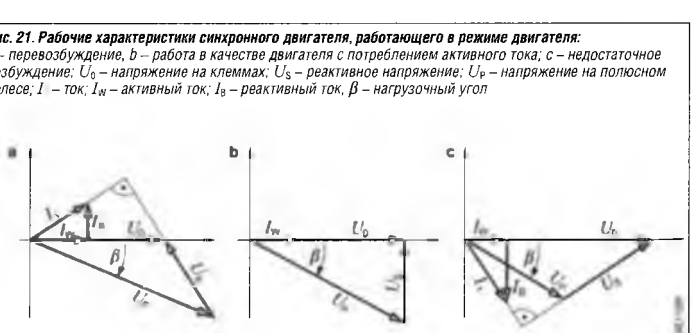
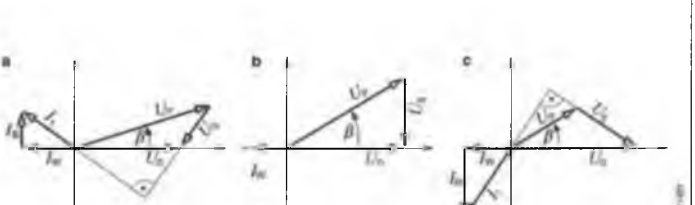
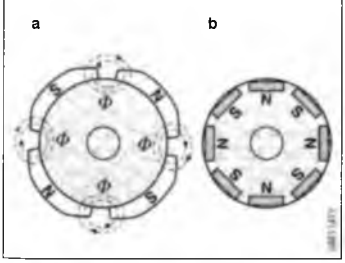


Рис. 22. Рабочие характеристики синхронного двигателя в режиме генератора:
a – перевозбуждение (емкостное); b – работа с отдачей активного тока; c – недостаточное возбуждение (индуктивное); U_0 – напряжение на клеммах; U_S – реактивное напряжение, U_P – напряжение на полюсном колесе; I – ток; I_W – активный ток; I_B – реактивный ток; β – нагрузочный угол



Дальнейшее снижение напряжения на полюсном колесе приводит к недостаточному возбуждению. Электродвигатель ведет себя индуктивно. Он потребляет реактивную мощность (рис. 22, с).

Рис. 23. Виды роторов для электронных двигателей:
а – ротор с поверхностными магнитами;
b – ротор со встроенными магнитами (скрытыми магнитами),
Ф – магнитный поток ротора

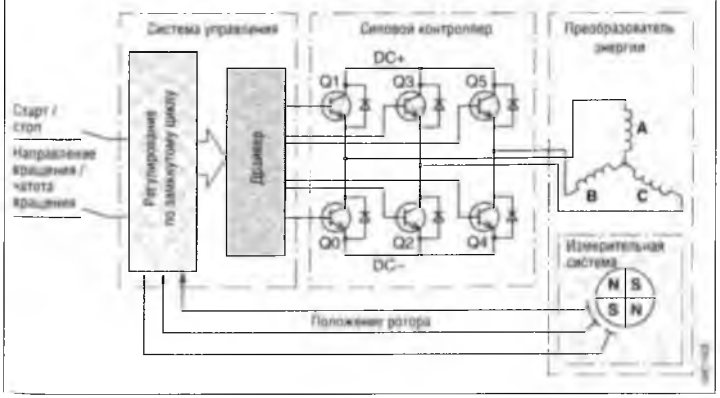


Электронно-коммутируемые двигатели

В случае с электронно-коммутируемыми двигателями (электронные двигатели), возбуждающая обмотка ротора, в том числе электрический контакт с токоприемными кольцами, не требуются. Электронно-коммутируемые двигатели представляют собой бесщеточные синхронные двигатели, где роторы снабжаются постоянными магнитами. Постоянные магниты могут располагаться, к примеру, на поверхности ротора или внутри него (рис. 23). Коммутация тока происходит в фиксированной обмотке статора с помощью электронного блока (рис. 24).

Частота вращения электронно-коммутируемого двигателя задается частотой окружающего поля статора. Для определения положения ротора требуются датчики. Широко распространены датчики Холла, устанавливаемые в рабочем зазоре для обеспечения цикличного переключения между ветвями обмотки с помощью активационной электроники.

Рис. 24. Активационная электроника электронно-коммутируемого двигателя



Система трехфазного тока

Техническое значение имеет применение системы трехфазного переменного тока в качестве системы трехфазного тока, основной особенностью которой является то, что сумма всех напряжений и токов всегда равна нулю.

Определения

Электрические цепи называются фазами m. Совокупность электрических цепей, в которых напряжения одной частоты оказывают воздействие и имеют фазовый, сдвиг называются многофазными системами. Многофазная система состоит из ветвей обмотки. В многофазной системе может быть $n = 3$ симметричных систем (рис. 25). Во всех симметричных системах – за исключением нулевой системы – сумма всех векторов равна нулю. При количестве фаз m получаем n симметричных систем в зависимости от угла сдвига фаз α:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m} n$$

Задача обмоток – создание вращающегося поля. Асинхронные двигатели имеют такую же конструкцию статора. В воздушном зазоре должно создаваться магнитное поле с постоянной амплитудой, вращающееся с постоянной угловой скоростью. Чтобы создать это поле, временные положения фаз токов должны совпадать с пространственными положениями соответствующих ветвей. У простой симметричной системы ($n = 1$) с $m = 3$ три ветви (обозначаемые как U, V и W) и, следовательно, обмотки должны быть равномерно распределены по окружности. На рис. 26 показано расположение обмотки с тремя ветвями, с одной катушкой на каждую пару полюсов и ветвь. Схемы соединений фаз регламентируются стандартом DIN EN 60034, часть 8 [2].

Создание вращающегося поля

Чтобы создать вращающееся поле в случае с простой симметричной системой ($n = 1$) с количеством ветвей $m = 3$, ветви должны быть геометрически смещены на электрически эффективный угол:

$$\alpha_{el} = 360° \cdot \frac{1}{3} = 120°.$$

При одной катушке на каждую пару полюсов и ветвь создаваемое магнитное поле вращается против часовой стрелки, при этом «индикаторная полоска», смещающаяся вправо на рисунке 27, a (при $\alpha = 90°$), показывает ток фазы в каждой из ветвей на рис. 27, b в направлении магнитного потока. Расположение образует пару полюсов. Соответствующие магнитные потоки проходят вертикально к плоскости ветвей обмотки (рис. 27, b).

Поток Φ_{Res} (рис. 27, c), получаемый из трех ветвей, а также его направление достигаются геометрическим сложением трех отдельных потоков Φ_U, Φ_V и Φ_W.

Рис. 25. Симметричные системы:
a – Со-система, n = 1, α = 2π/3 (120°),
b – контрсистема, n = 2, α = 4π/3 (240°),
c – нулевая система, n = 1, α = 0;
n – симметричные системы,
α – сдвиг фаз

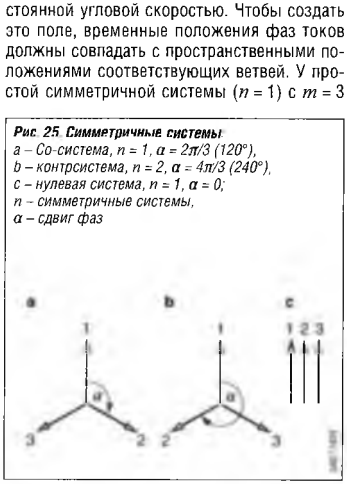
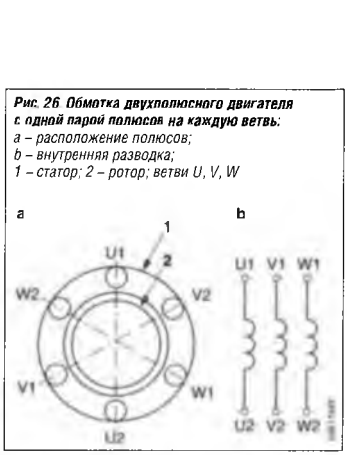


Рис. 26. Обмотка двухполюсного двигателя с одной парой полюсов на каждую ветвь:
a – расположение полюсов;
b – внутренняя разводка;
1 – статор; 2 – ротор; ветви U, V, W



Продвижение индикаторной полоски на угол $\alpha = 180°$ приводит к реверсированию направления тока в ветви W и, следовательно, к дальнейшему повороту созданного поля Φ_{Res} вправо (рис. 28).

При использовании двух катушек на одну ветвь расположение проводников «удваивается». Если обмотка должна образовывать две пары полюсов ($p = 2$), то обмотки необходимо делить на группы (рис. 29). При этом устанавливается механически эффективный угол:

$$\alpha_m = 360° \frac{1}{m\,p} = 60°.$$

Электрически эффективный угол остается без изменения. В случае как двухполюсного, так и четырехполюсного расположения поле вращается против часовой стрелки (рис. 30). Частоту вращения поля:

$$n_{fe} = \frac{f_n}{p}$$

можно вычислить на основании частоты в линии f_n и количества пар полюсов p. При $p = 1$ частота вращения поля равна частоте в линии (табл. 2).

Рис. 27. Создание вращающегося поля с одной катушкой на ветвь:
a – токи ветвей;
b – токи ветвей с углом $\alpha = \alpha_1$;
c – направление вращающегося поля (пространственные направления);
1 – статор; 2 – ротор;
ветви U, V, W

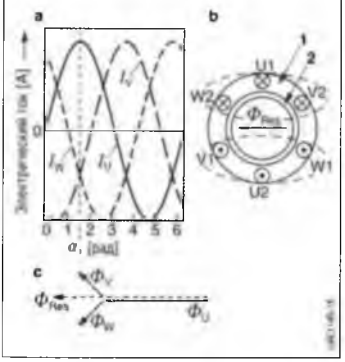


Таблица 2. Частота вращения полей

Пара полюсов p	n_0 [мин$^{-1}$] при $f = 50$ Гц
1	3000
2	1500
3	1000

Рис. 28. Создание вращающегося поля с одной катушкой на ветвь:
a – токи ветвей;
b – токи ветвей с углом $\alpha = \alpha_2$;
c – направление вращающегося поля (пространственные направления),
1 – статор; 2 – ротор; ветви U, V, W

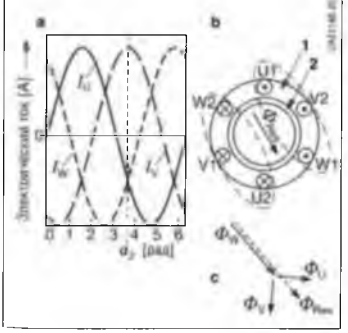
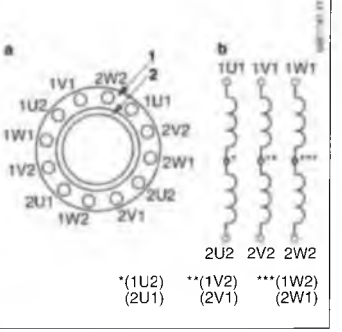


Рис. 29. Обмотка с двумя парами полюсов на каждую ветвь:
a – расположение полюсов;
b – внутренние соединения (пример);
соединения в скобках являются внутренними и поэтому недоступны;
1 – статор, 2 – ротор; ветви U, V, W



Вместе с количеством пар полюсов можно вычислить межполюсное расстояние:

$$\tau_p = \frac{d_{si}}{2p}$$

как долю окружности статора, где d_{si} – внутренний диаметр статора. Он соответствует длине синусоидальной полуволны, которая соответствует распределению индукции поля ротора. В случае с двухполюсным двигателем ($p = 1$), межполюсное расстояние всегда равно $\alpha_{el} = 180°$ (электрический угол) и совпадает с механическим углом α_m. Взаимозависимость этих двух углов показывает угол $\alpha_{el} = p \cdot \alpha_m$. Чтобы в обмотках наводилось одинаковое напряжение, ветви обмотки должны быть смещены относительно друг друга на угол $\alpha_{el} = 120°$ или $2\tau_p/3$, а структура и количество катушек должны быть одинаковыми. На каждую ветвь приходится одна треть межполюсного расстояния.

Рис. 30. Создание вращающегося поля с двумя катушками на ветвь:
a – токи ветвей с углом $\alpha = \alpha_1$;
b – получаемое магнитное поле с $\alpha = \alpha_1$,
1 – статор; 2 – ротор; ветви U, V, W

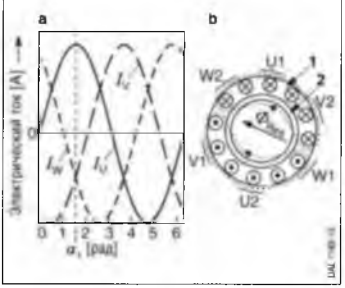
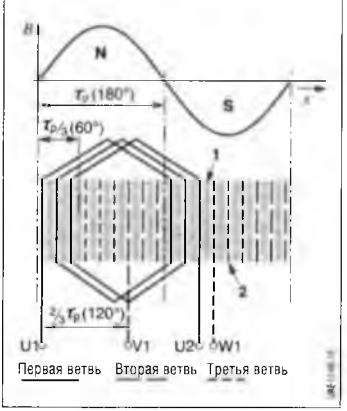


Рис. 31. Структура трехфазной обмотки статора:
1 – зуб статора, 2 – канавка статора с ветвью обмотки



Список литературы

[1] DIN 42027: Servomotors; Classification, Overview.
[2] DIN EN 60034, Part 8: Rotating Electrical Machines; Connection Designations and Direction of Rotation.
[3] DIN 1304 Part 7: Formula Symbols for Electrical Machines.
[4] Wolff, I.: Maxwellsche Theorie – Grundlagen und Anwendungen; Volume 1, Elektrostatik. 5th Edition, Verlagsbuchhandlung Dr. Wolff, 2005.
[5] Wolff, I.: Maxwellsche Theorie – Grundlagen und Anwendungen; Volume 2, Stromungsfelder, Magnetfelder und Wellenfelder, 5th Edition, Verlagsbuchhandlung Dr. Wolff, 2007.
[6] Wunsch, G.: Elektromagnetische Felder, 2nd Edition, Verlag Technik, 1996.
[7] Fischer, R.: Elektrische Maschinen, 13th Edition, Carl Hanser Verlag, 2006.
[8] Fuest, K.; Döring, P.: Elektrische Maschinen und Antriebe, 6th Edition, Vieweg-Verlag, 2008.

Генераторы переменного тока

Генерирование электроэнергии

Генератор требуется автомобилю для заряда аккумуляторной батареи и запитывания электрооборудования, такого как система зажигания и впрыска топлива, ЭБУ, освещение и пр. Для заряда аккумуляторной батареи генератору необходимо выдавать больший ток, чем требуется включенному электрооборудованию. Мощность генератора, емкость аккумуляторной батареи и потребляемая мощность электрооборудования должны соответствовать друг другу, чтобы при любых условиях эксплуатации в бортовую сеть поступал достаточный ток, и аккумуляторная батарея всегда достаточно заряжалась, т.е. чтобы поддерживался адекватный зарядный баланс.

Поскольку аккумуляторная батарея и многие элементы электрооборудования должны получать постоянный ток, вырабатываемый генератором переменный ток выпрямляется. Генератор оснащается регулятором напряжения, позволяющим подавать на аккумуляторную батарею и электрооборудование постоянное напряжение. Генераторы в легковых автомобилях рассчитаны на зарядное напряжение 14 В, а во многих грузовых автомобилях – на 28 В (28-вольтовая электросистема).

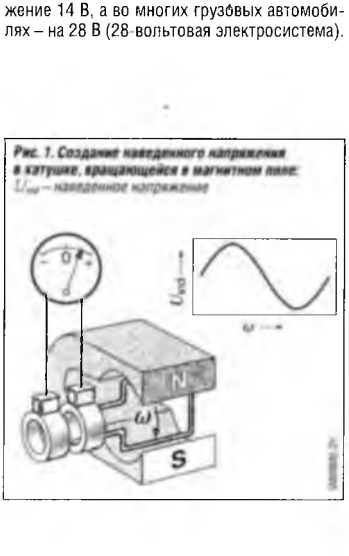


Рис. 1. Создание наведенного напряжения в катушке, вращающейся в магнитном поле: U_{ind} – наведенное напряжение

Требования

Основными требованиями к генераторам являются:

- подача напряжения постоянного тока для электрооборудования системы;
- обеспечение резервов по мощности для заряда аккумуляторной батареи даже при постоянно включенной нагрузке от непрерывно эксплуатируемых устройств;
- поддержание постоянного напряжения генератора в полном диапазоне частоты вращения и нагрузки;
- высокий уровень к.п.д.;
- низкий уровень шума;
- надежная конструкция, способная выдерживать внешние нагрузки (вибрацию, высокую окружающую температуру, перепады температуры, грязь, влагу);
- длительный срок службы, сравнимый со сроком службы самого автомобиля (легкового);
- малая масса;
- компактные размеры.

Принцип электромагнитной индукции

При изменении магнитного поля в катушке в ней наводится напряжение (рис. 1). Согласно закону Фарадея наведенное напряжение U_{ind} растет с увеличением скорости v движения перпендикулярно линиям поля и с увеличением магнитного потока Φ через поперечное сечение проводника. Это можно описать выражением:

$$U_{ind} \sim d\Phi/dt\ .$$

Магнитное поле для создания наведенного напряжения (поле возбуждения) может быть создано постоянными магнитами. Их преимущество состоит в простоте конструкции. Это решение используется в небольших генераторах (например, велосипедных динамомашинах). Недостатком возбуждения с помощью постоянных магнитов является невозможность регулировки.

Регулируемое поле возбуждения можно создать электромагнитами. Электромагнит состоит из железного сердечника и обмотки (обмотки возбуждения), через которую протекает ток возбуждения. Количество обмоток вместе с величиной тока возбуждения определяют силу магнитного поля. Намагничиваемый железный сердечник в электромагните проводит создаваемое катушкой магнитное поле.

Путем изменения тока возбуждения можно регулировать магнитное поле и, соответственно, величину наведенного напряжения.

Когда ток возбуждения дает внешний источник (например, батарея), это называют внешним возбуждением. Когда ток возбуждения берется непосредственно из тока, вырабатываемого генератором, это называют самовозбуждением.

Конструкция генератора

Основными компонентами генератора являются трех- или многофазные обмотки якоря и система возбуждения (рис. 2). Поскольку конструкция обмотки якоря сложнее, чем конструкция системы возбуждения, и создаваемые в обмотке якоря токи больше тока возбуждения, обмотки якоря размещаются в неподвижном статоре. Магнитные полюса с обмоткой возбуждения размещаются на вращающейся части – роторе. Магнитное поле ротора создается сразу при протекании тока возбуждения через эту обмотку. Генератор должен иметь большое количество пар полюсов, чтобы он мог создавать высокое наведенное напряжение уже на низких оборотах. Большое количество полюсов создает высокий уровень реакции на оборот и, соответственно, высокое наведенное напряжение. Это необходимое условие для получения высокой мощности генератора.

У генераторов с клювообразными полюсами магнитное поле одной катушки возбуждения может быть разделено таким образом, чтобы создать необходимые 12–16 полюсов или 6–8 пар полюсов (рис. 2 и 3).

Якорь в генераторе содержит три или более идентичных обмотки (фазы), пространственно смещенных относительно друг друга (рис. 2). Из-за пространственного смещения обмоток генерируемые в них синусоидально изменяющиеся напряжения так же сдвигаются по фазе (смещение во времени, рис. 4). Получаемый переменный ток называют трехфазным.

Выпрямление напряжения переменного тока

Создаваемое генератором напряжение переменного тока необходимо выпрямить, поскольку для аккумуляторной батареи и автомобильной электроники требуется постоянный ток.

К каждой фазе подключается два силовых диода – один с положительной стороны, обычно подключаемый через положительный теплоотвод выпрямителя к плюсовой клемме аккумуляторной батареи, и один – с отрицательной, подключаемый через отрицательный теплоотвод выпрямителя к корпусу генератора (минусовая клемма аккумуляторной батареи) (рис. 2). Корпус генератора также электрически соединяется с землей через точки крепления генератора. Положительные полуволны проводятся диодами на положительной стороне (плюсовая клемма аккумуляторной батареи), а отрицательные – диодами на отрицательной стороне (масса). Этот принцип называется полноволновое выпрямление (рис. 4).

В случае с генераторами, у которых обмотка статора подключается «звездой» (рис. 5, а), два дополнительных диода выпрямляют положительную и отрицательную полуволны

Рис. 2. Базовая конструкция генератора с клювообразными полюсами с коллекторными кольцами:
1 – ротор, 2 – обмотка возбуждения, 3 – обмотка якоря, 4 – статор, 5 – коллекторные кольца; 6 – щетки, 7 – диоды выпрямителя; B+ – плюсовая клемма аккумуляторной батареи; B– – минусовая клемма аккумуляторной батареи

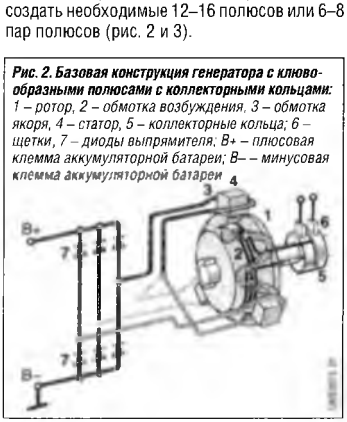


Рис. 3. Компоненты 12-полюсного ротора с клювообразными полюсами:
1 – клювообразный полюс со стороны генератора, 2 – катушка индуктивности; 3 – клювообразный полюс со стороны аккумуляторной батареи, 4 – фаска на краю пальца с клювообразным полюсом; 5 – вал генератора



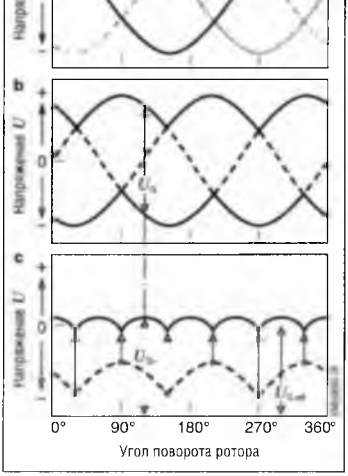
нейтральной точки звезды. Путем выпрямления третьей гармоники в фазовых напряжениях эти дополнительные диоды могут увеличить выходной ток генератора при 6000 мин$^{-1}$ на 10%.

Таким образом, эффективность генератора значительно повышается в верхнем диапазоне оборотов. В нижнем диапазоне оборотов амплитуда третьей гармоники оказывается ниже напряжения в бортсети, и дополнительные диоды не могут выдавать ток. Дополнительные диоды редко используются в современных генераторах.

Постоянный ток, отдаваемый генератором при электрической нагрузке через клеммы B+ и B– в бортовую сеть, имеет небольшие пульсации. Эти пульсации сглаживаются аккумуляторной батареей, подключаемой параллельно генератору и, при необходимости, конденсаторами в бортсети.

Вместо силовых диодов с высокой блокирующей способностью в современных генераторах для выпрямления переменного тока используются диоды Зенера. Они ограничивают максимальные напряжения до уровней, которые безвредны для синхронных генераторов и регуляторов (защита от выбросов мощности). Дополнительно стабилитроны могут применяться для обеспечения дистанционной защиты другого чувствительного к напряжению оборудования, входящего в состав автомобильной электрической системы. При использовании генератора на 14 В напряжение срабатывания выпрямителя с диодами Зенера варьируется от 25 до 30 В.

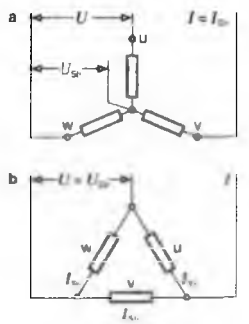
Рис. 4. Выпрямление трехфазного тока:
a – напряжение трехфазного тока;
b – напряжение генератора, образованное огибающими положительной и отрицательной полуволн; c – выпрямленное напряжение генератора; U_P – напряжение фазы, U_t – напряжение на выпрямителе (отрицательное не на массу); $U_{t=}$ – постоянное напряжение генератора (отрицательное на массу); $U_{G,eff}$ – эффективное значение прямого напряжения



Цепи генераторов

В трехфазных генераторах для передачи электроэнергии в случае неподключенных обмоток потребовалось бы шесть токовых вводов. Это количество можно уменьшить до трех, объединив три цепи. Цепи соединяются по схеме «звезда» (рис. 5, a) или «треугольник» (рис. 5, b).

Рис. 5. Типы подключения трехфазных обмоток статора (трехфазные обмотки):
a – соединение звездой; b – соединение треугольником; U – напряжение генератора, U_{Str} – фазное напряжение, I –ток генератора; I_{Str} – фазный ток; фазы U, V, W



В случае соединения звездой концы трех фаз обмотки соединяются в одной точке – нейтральной точке звезды. Без нейтрального проводника общая сумма трех токов к нейтральной точке всегда равна нулю.

Блок обратного тока

Выпрямительные диоды в генераторе служат не только для выпрямления вырабатываемого им напряжения, но и для предотвращения разряда аккумуляторной батареи через обмотки статора. Когда двигатель выключен или его обороты настолько малы, что генератор не возбуждается, без диодов ток аккумуляторной батареи должен был бы протекать через обмотку статора. Диоды поляризуются относительно напряжения аккумуляторной батареи в противоположном направлении, чтобы предотвратить любой значительный разрядный ток. Поэтому ток может течь только от генератора к аккумуляторной батареи.

Обычно генераторы не снабжаются средствами защиты от обратной полярности. Изменение же полярности в аккумуляторной батарее приводит к разрушению диодов генератора, а также подвергает опасности компоненты полупроводников других устройств в автомобиле.

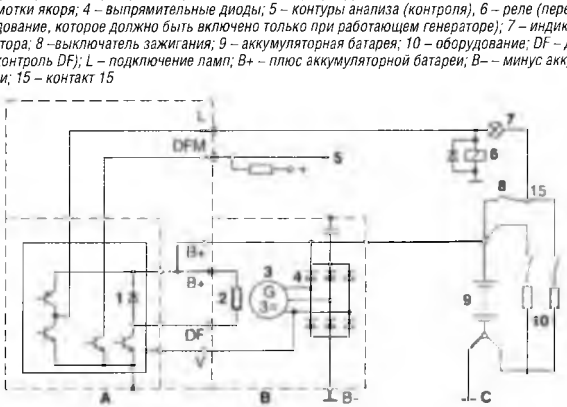
Регулирование напряжения

При постоянном токе возбуждения напряжение генератора зависит от частоты вращения ротора и нагрузки. Функция регулирования напряжения заключается в поддержании напряжения генератора и, соответственно, напряжения в бортсети постоянным во всем диапазоне оборотов двигателя независимо от электрической нагрузки. Для этого регулятор напряжения корректирует величину тока возбуждения путем циклической активации и деактивации напряжения в возбуждающей обмотке. Регулятор корректирует отношение времени включения ко времени выключения в зависимости от напряжения, создаваемого генератором. В периоды, когда регулятор деактивирует напряжение, из-за высокой индуктивности катушки возбуждения ток возбуждения течет через нерегулируемый диод, подключенный параллельно обмотке возбуждения (рис. 6). Таким образом, регулятор поддерживает напряжение в бортсети постоянным и предотвращает перезаряд или разряд аккумуляторной батареи во время эксплуатации автомобиля.

Регуляторы

Регуляторы напряжения раньше изготавливались с помощью дискретных компонентов. Сегодня они включают в себя гибридные или монолитные контуры (рис. 6). При использовании монолитной технологии изготовления контрольная и регулирующая интегральная схема, транзистор большой мощности и гасящий диод располагаются в одном блоке.

Рис. 6. Генератор:
а – регулятор; b – генератор; с – бортовая сеть; 1 – нерегулируемый диод; 2 – обмотка возбуждения, 3 – обмотки якоря; 4 – выпрямительные диоды; 5 – контуры анализа (контроля), 6 – реле (переключает оборудование, которое должно быть включено только при работающем генераторе); 7 – индикатор генератора; 8 –выключатель зажигания; 9 – аккумуляторная батарея; 10 – оборудование; DF – динамо-поле, DFM (контроль DF); L – подключение ламп; B+ – плюс аккумуляторной батареи; B– – минус аккумуляторной батареи; 15 – контакт 15



В дополнение к описанным выше функциям регулировки напряжения многофункциональные регуляторы напряжения выполняют специальные функции. Особого внимания заслуживает функция реагирования на нагрузку (LR). Различают LR при работающем двигателе и LR при запуске двигателя. LR при работающем двигателе помогает улучшить характеристики двигателя внутреннего сгорания в плане работы и токсичности ОГ путем ограниченного увеличения мощности со временем. LR при запуске двигателя означает, что генератор не работает в течение определенного времени после запуска, чтобы стабилизировались холостые обороты двигателя.

Интеллектуальное регулирование генератора

Регуляторы напряжения с цифровыми интерфейсами улучшают совместимость между системами управления двигателем и регулирования генератора переменного тока. Здесь используют различные интерфейсы (например, бит-синхронный интерфейс или LIN-интерфейс) в зависимости от изготовителя автомобиля.

Управляющее напряжение можно регулировать через интерфейс регулятора. Если установить низкое управляющее напряжение, это приведет к падению или отсутствию мощности генератора. Подводимая мощность и крутящий момент на валу генератора падают до низкого уровня. С другой стороны, напряжение генератора можно повысить через интерфейс, чтобы генератор заряжал аккумуляторную батарею и запитывал электрооборудование автомобиля.

Поскольку генератор преобразует механическую энергию в электрическую, подводимая мощность на валу генератора увеличивается с ростом выходной электрической мощности. Двигатель внутреннего сгорания требует больше топлива для покрытия потребностей генератора в подводимой мощности. Однако если напряжение генератора повышается при движении накатом, то энергия, отбираемая генератором с коленчатого вала не стоит ни капли дополнительного топлива, потому что отсечка топлива при движении накатом останавливает подачу топлива. Когда водитель нажимает педаль газа, ЭБУ двигателя снова снижает напряжение генератора через интерфейс связи с регулятором, чтобы снять нагрузку с двигателя в виде крутящего момента генератора. Этот процесс известен также как интеллектуальное регулирование генератора и рекуперация.

Интерфейсные регуляторы позволяют точно подстроить функции реагирования на нагрузку к режиму работы двигателя, оптимизировать профили момента для сокращения расхода топлива и отрегулировать зарядное напряжение для улучшения состояния заряда аккумуляторной батареи.

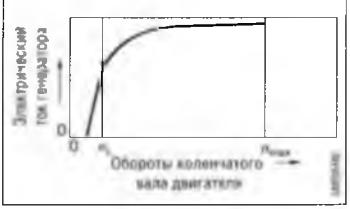
Характеристики генератора

Генератор может подавать ток в бортовую сеть лишь при условии, что наведенное напряжение U_{ind} в обмотках статора будет больше, чем общая сумма прямых напряжений двух диодов и напряжение в бортсети на клеммах B+ и B–. Поскольку наведенное напряжение:

$$U_{ind} \sim d\Phi/dt$$

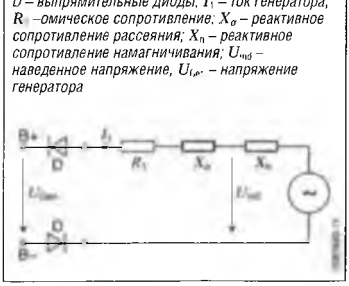
зависит от частоты изменения магнитного потока, т.е. от оборотов ротора, существует диапазон от нуля до оборотов самовозбуждения, в котором генератор не выдает ток (рис. 7).

Рис. 7 Характеристическая кривая при максимальном токе генератора при постоянном напряжении:
n_L – холостые обороты; n_{max} – повышенные холостые обороты



Затем ток генератора резко растет в условиях полной нагрузки с повышением оборотов. На более высоких оборотах напряжение при реактивном сопротивлении намагничивания X_h (рис. 8) и реактивном сопротивлении рассеяния X_σ падает так сильно, что, несмотря на рост наведенного напряжения, ток не растет столь значительно. Реактивное сопротивление намагничивания получается из той части индуктивности катушки, которая создает полезное наведенное напряжение и магнитный поток которой занимает предусмотренные траектории в роторе и статоре. Реактивное сопротивление рассеяния образует ту часть магнитного потока, которая не связана с ротором – т.е. поля рассеяния, закорачиваемые, к примеру, в крайней обмотке или прямо через канавку.

Рис. 8. Упрощенное обозначение фазы с выпрямлением:
B+ – плюсовая клемма аккумуляторной батареи; B– –минусовая клемма аккумуляторной батареи, D – выпрямительные диоды; I_1 – ток генератора; R_1 –омическое сопротивление; X_σ – реактивное сопротивление рассеяния; X_h – реактивное сопротивление намагничивания; U_{ind} – наведенное напряжение, $U_{г.ф.}$ – напряжение генератора



Условия работы

Частота вращения

Использование генератора (создаваемая энергия на килограмм массы) увеличивается с ростом оборотов двигателя. Поэтому необходимо использовать максимально высокое передаточное отношение между генератором и коленчатым валом двигателя. Однако важно, чтобы при максимальных оборотах двигателя не превышались максимально допустимые обороты генератора. Максимально допустимые обороты автомобильных генераторов определяются расширением клювообразных полюсов и сроком службы шариколодшипников. Типичные значения для максимальных оборотов автомобильных генераторов находятся в диапазоне 18 000–22 000 мин$^{-1}$. Передаточное отношение для легковых автомобилей находится в пределах 1:2,2–1:3; а для грузовых 1:5.

Охлаждение

Потери при преобразовании механической энергии в электрическую приводят к нагреву деталей генератора. Для охлаждения большинства современных автомобильных генераторов используется окружающий воздух в моторном отсеке. Если его недостаточно для охлаждения генератора, то подходящими решениями для адекватного охлаждения становятся нагнетание воздуха из более прохладных мест и жидкостное охлаждение.

Вибрации двигателя

Генератор, в зависимости от условий монтажа и вибрационных характеристик двигателя, может подвергаться вибрационным ускорениям 500–800 м/с^2. Таким образом, крепления и компоненты генератора подвержены воздействию значительных сил. Поэтому совершенно необходимо избегать критических значений частоты собственных колебаний в генераторе.

Климат моторного отсека

Генератор подвергается воздействию брызг воды, грязи, масла и распыленного топлива, а также соли, песка и гравия. Генератор должен защищаться от коррозии, чтобы можно было предотвратить образование путей утечки тока между деталями, находящимися под напряжением.

Акустика

Жесткие требования к уровню шума в современных автомобилях и отличная плавность работы современных двигателей внутреннего сгорания требуют тихо работающих генераторов. Наряду с фасками на пальцах генераторов с клювообразными полюсами, уменьшающими жесткое прерывание магнитного потока на краях пальцев, существуют и другие возможности уменьшения шума, создаваемого магнитами автомобильных генераторов. Можно использовать следующее: во-первых, пять фаз в пентаграммном соединении (рис. 9) и, во-вторых, две трехфазных системы, электрически смещенных на 30°.

Рис. 9. Пятифазная обмотка статора с пентаграммным соединением с подключенным мостовым выпрямителем:
B+ – плюсовая клемма аккумуляторной батареи, B– – минусовая клемма аккумуляторной батареи

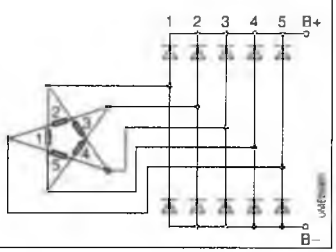
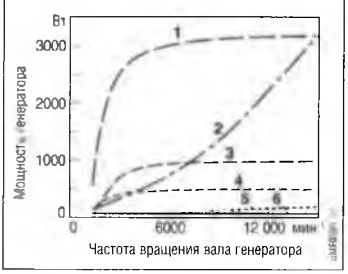


Рис. 10. Распределение потерь генератора, рассчитанного на ток 220 А:
1 – выходная мощность генератора; 2 – потери в железе, 3 потери в меди статора; 4 – потери в выпрямителе; 5 – потери на трение; 6 – потери в меди обмотки возбуждения (ротор)



Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия представляет собой отношение мощности, которая подается на каков-либо устройство, к мощности на выходе. Потери неизбежны для всех процессов, при которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Потери в генераторе с клювообразными полюсами классифицируются следующим образом (рис. 10).

Потери в генераторе с клювообразными полюсами

Потери в меди обмоток статора и ротора

Омические потери в обмотках статора и обмотке ротора называются потерями в меди. Они пропорциональны квадрату тока.

Потери в железе в пластинчатом сердечнике статора

Потери в железе – результат гистерезиса и вихревых токов, наводимых переменными магнитными полями в железе статора и ротора.

Потери вихревых токов на поверхности клювообразных полюсов

Потери вихревых токов на поверхности клювообразных полюсов вызваны колебаниями магнитного потока из-за наличия пазов в статоре.

Потери в выпрямителе

Потери в выпрямителе вызываются падением напряжения на диодах. Их можно уменьшить и, соответственно, поднять к.п.д. путем использования полупроводников с меньшим падением напряжения – например, высокоэффективных диодов (HED).

Механические потери

Механические потери включают трение, возникающее в роликовых подшипниках и контактных кольцах, аэродинамическое трение в вентиляторе. Прежде всего, имеются потери мощности (необходимой для приведения в действие самого вентилятора) которые увеличиваются с повышением частоты вращения.

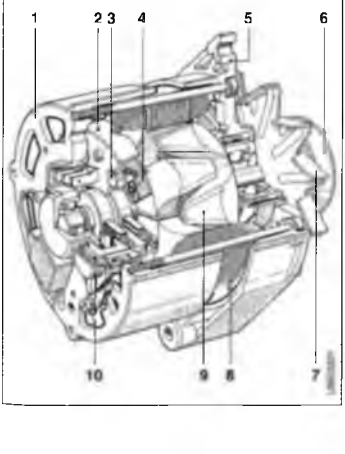
К ним относятся и аэродинамические потери, вызванные вентилятором и клювообразными полюсами.

Повышение к.п.д.
В обычном режиме эксплуатации генератор работает в диапазоне частичной нагрузки. В этом случае к.п.д. на средних оборотах составит 70–80 %. Использование более крупного (и более тяжелого) генератора позволяет ему работать в более благоприятном диапазоне частичной нагрузки при той же электрической нагрузке. Увеличение к.п.д., обеспечиваемое более крупным генератором, с избытком компенсирует потери в экономии топлива, связанные с большей массой. Однако следует учитывать более высокий момент инерции в ременном приводе.

Типы генераторов с клювообразными полюсами

Генераторы с клювообразными полюсами полностью заменили стандартно использовавшиеся ранее генераторы постоянного тока. При равной выходной мощности генератор с клювообразными полюсами имеет меньшую на 50 % массу, а также значительно дешевле в изготовлении. Крупномасштабное применение (в начале 1960-х годов) стало возможным только благодаря компактным, мощным, недорогим и надежным кремниевым диодам.

Рис. 11. Генераторы на компактных диодах:
1 – торцевой щит с коллекторными кольцами; 2 – радиатор выпрямителя; 3 – силовой диод; 4 – диод возбуждения; 5 – щит со стороны привода с монтажными фланцами, 6 – ременной шкив; 7 – внешний вентилятор; 8 – статор; 9 – ротор с клювообразными полюсами; 10 –транзисторный регулятор



Генераторы на компактных диодах
Классическая конструкция автомобильного генератора характеризуется большим внешним вентилятором, обеспечивающим однопоточную осевую вентиляцию (рис. 11). Поскольку выпрямитель, регулятор и система щеток и коллекторных колец располагаются внутри торцевого щита, то вал внутри коллекторных колец должен быть относительно толстым, чтобы передавать силы ременного привода на внешний шарикоподшипник. Поэтому коллекторные кольца имеют больший диаметр, ограничивающий срок службы щеток.

Компактные генераторы
Генераторы современных легковых автомобилей (рис. 12) охлаждаются двухпоточной вентиляцией, обеспечиваемой двумя внутренними вентиляторами. Охлаждающий поток направляется из окружающего воздуха вдоль оси и выходит из генератора радиально вблизи лобовых частей статорных обмоток через щели в подшипниковых щитках со стороны привода и со стороны контактных колец. Основные преимущества генератора компактной конструкции:
- высокая степень использования благодаря высокой максимальной частоты вращения;
- низкие аэродинамические шумы благодаря небольшому диаметру вентиляторов;
- низкий уровень магнитного шума;
- большой срок службы щеток из-за меньшего размера диаметра контактного кольца.

Бесщеточные генераторы
Являются вариацией специальной конструкции клювообразно-полюсного устройства, в котором вращаются только клювообразные полюсы, тогда как обмотка возбуждения остается неподвижной. Одна из полюсных половин удерживается напротив другой полюсной половины посредством немагнитного кольца. Магнитный поток, кроме нормального рабочего зазора, должен пересекать два дополнительных воздушных зазора. С помощью этой конструкции выпрямитель подает ток в обмотку возбуждения непосредственно через регулятор напряжения, поэтому

контактные кольца и скользящие контакты не нужны. Это расположение позволяет избежать износа, характерного для системы с щетками и коллекторными кольцами, позволяя проектировать генераторы с гораздо большим сроком службы. Поэтому они подходят для использования, например, в строительной и железнодорожной технике. Масса такого устройства несколько больше, чем у генераторов с клювообразными полюсами и токосборными кольцами той же мощности.

Безобмоточный ротор также используется в генераторах с жидкостным охлаждением (рис. 13). В случае с этим генератором охлаждающая жидкость двигателя течет по всей рубашке задней части корпуса генератора. Электронные компоненты монтируются на передней крышке, находящейся со стороны привода.

Рис. 13. Генератор с жидкостным охлаждением и безобмоточным ротором:
1 – ременной шкив; 2 – выпрямитель; 3 – регулятор; 4 – щит со стороны привода; 5 – корпус генератора; 6 – рубашка охлаждения; 7 – корпус рубашки для крепления к двигателю; 8 – стационарная обмотка возбуждения; 9 – сердечник статора; 10 – обмотка статора; 11 – безобмоточный ротор; 12 – немагнитное промежуточное кольцо; 13 – токопроводящий

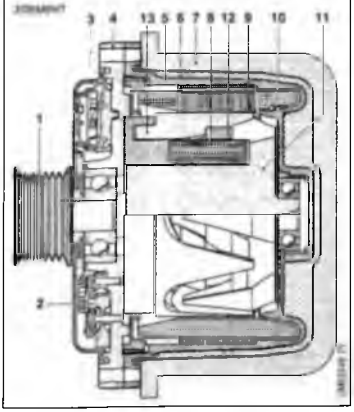
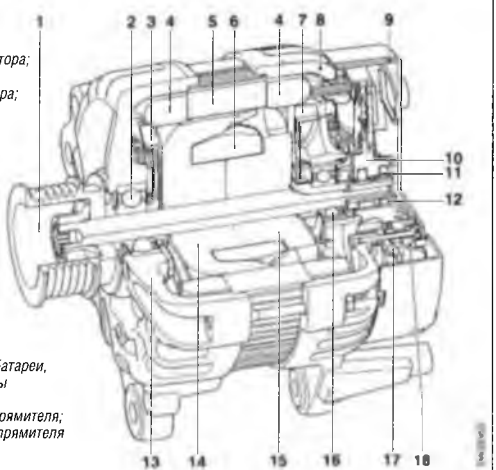


Рис. 12 Компактный генератор серии Bosch EL аккумуляторной батареи:
1 – ременной шкив;
2 – сторона генератора; шарикоподшипник;
3 – вентилятор со стороны генератора;
4 – головки обмотки статора,
5 – пластинчатый сердечник статора;
6 – обмотка ротора (обмотка возбуждения);
7 – вентилятор со стороны аккумуляторной батареи;
8 – торцевой щит со стороны аккумуляторной батареи,
9 – защитный колпачок;
10 – держатель щеток;
11 – угольная щетка;
12 – коллекторное кольцо;
13 – торцевой щит со стороны генератора;
14 – клювообразный полюс со стороны генератора;
15 – клювообразный полюс со стороны аккумуляторной батареи,
16 – шарикоподшипник со стороны аккумуляторной батареи;
17 – отрицательный радиатор выпрямителя;
18 – положительный радиатор выпрямителя



Системы пуска двигателей

Стартер

Требования

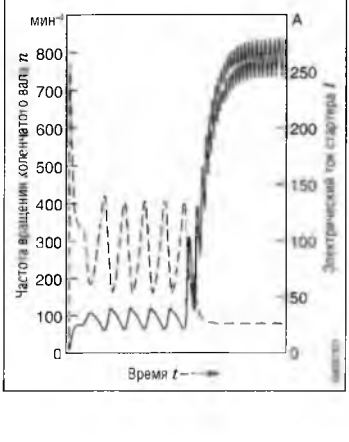
Автомобильным двигателям внутреннего сгорания требуется помощь в запуске. Системы пуска двигателей состоят из следующих компонентов:

- электродвигатель постоянного тока (стартер);
- коммутационная аппаратура и блоки управления;
- аккумуляторная батарея;
- проводка.

Обороты стартера, гораздо большие, чем обороты коленчатого вала двигателя, согласуются с оборотами коленчатого вала двигателя через редуктор с подходящим передаточным соотношением (1/10–1/20), расположенный между шестерней стартера и зубчатым венцом маховика двигателя. Небольшой стартер способен развить необходимые обороты для надежного пуска двигателя (двигателям с искровым зажиганием требуется 60–100 мин$^{-1}$; дизельным двигателям – 80–200 мин$^{-1}$). Компрессия и декомпрессия в цилиндрах означает, что момент, необходимый для проворачивания коленчатого вала, значительно разнится, в результате чего также значительно колеблется мгновенная скорость вращения. На рис. 1 показан типичный график оборотов двигателя и тока стартера при холодном пуске.

Рис. 1. График оборотов коленчатого вала двигателя и пускового тока при холодном запуске:

——— обороты коленчатого вала двигателя;
– – – пусковой ток



Сам стартер должен удовлетворять следующим техническим требованиям:

- готовность к работе в любое время;
- достаточная пусковая мощность при разных температурах;
- длительный срок службы;
- надежность конструкции;
- малая масса и компактные размеры;
- отсутствие необходимости в обслуживании.

Конструктивные факторы

Для создания необходимой топливно-воздушной смеси для двигателей с икровым зажиганием и температуры автовоспламенения для дизельных двигателей стартер должен вращать коленвал ДВС с определенной минимальной скоростью. Частота вращения коленчатого вала двигателя сильно зависит от типа двигателя, его рабочего объема, числа цилиндров, степени сжатия, потерь на трение, дополнительных нагрузок, создаваемых при работе двигателя, системы управления подачей топлива, сорта используемого масла и окружающей температуры.

Вообще, пусковой момент и пусковая частота вращения при снижении температуры требуют постепенного увеличения пусковой мощности. Однако создаваемая пусковой аккумуляторной батареей мощность падает с понижением температуры, так как увеличивается ее внутреннее сопротивление. Эта противоречащая взаимосвязь требований к электрической нагрузке и доступной мощности означает, что наихудшим режимом работы для системы пуска ДВС является холодный пуск.

Из-за большого потребляемого стартером тока падение напряжения на питающих проводах значительно влияет на характеристики стартера.

Классификация

Автоматические системы пуска двигателей имеют номинальную мощность до 2,5 кВт при номинальном напряжении 12 В. Они могут запускать двигатели с искровым зажиганием рабочим объемом до 7 л и дизельные двигатели рабочим объемом до 3 л.

Стартеры можно классифицировать по следующим критериям, согласно их техническим типам:

- тип передачи мощности: стартер без редуктора или стартер с редуктором;
- тип создания магнитного поля в электродвигателе: с постоянным магнитом или с электрическим возбуждением;
- тип зацепления: скользящая шестерня, инерционный привод стартера (бендикс) или предварительное зацепление.

В современных автомобилях главным образом используются постоянно возбуждаемые стартеры с предварительным зацеплением с редуктором. Большая пусковая мощность сочетается в них с компактными размерами.

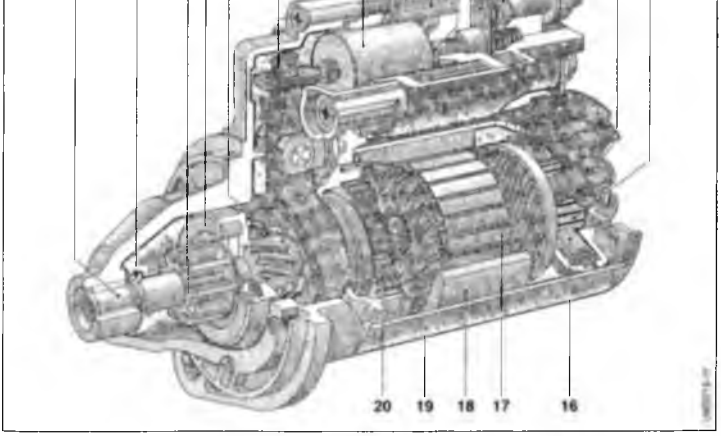
Конструкция и работа стартера

Стартер (рис. 2), по сути, состоит из электродвигателя, механизма привода и, начиная с мощности около 1 кВт, редуктора.

При запуске шестерня стартера входит в зацепление с маховиком посредством тягового реле. Стартер соединяется с шестерней привода либо напрямую, либо через редуктор, уменьшающий частоту вращения электродвигателя. Шестерня вращает коленчатый вал ДВС через зубчатый венец маховика до тех пор, пока ДВС не начнет устойчиво работать. После запуска двигателя он может быстро разогнаться до больших оборотов. После всего нескольких зажиганий двигатель ускоряется так мощно, что стартер уже не способен соответствовать его оборотам. ДВС «обгоняет» стартер и в результате может разогнать якорь до крайне высоких оборотов, если муфта свободного хода между шестерней и якорем не отменит нежелательную блокировку. Как только водитель отпустит ключ зажигания, тяговое реле обесточивается и буферная пружина выводит шестерню привода из зацепления с зубчатым венцом маховика с помощью спиральной канавки.

Рис. 2. Стартер с редуктором R70:

1 – приводной вал; 2 – стопорное кольцо; 3 – шестерня, 4 – муфта свободного хода; 5 – буферная пружина; 6 – рычаг привода; 7 – тяговое реле, 8 – удерживающая обмотка; 9 – втягивающая обмотка; 10 – возвратная пружина; 11 – контактная пластина; 12 – контактный болт; 13 – электрическое соединение; 14 – торцевой щит коллектора, 15 – коллектор; 16 – держатель щеток; 17 – якорь, 18 – магниты; 19 – корпус; 20 – планетарный редуктор



Электродвигатель стартера

Электродвигатель стартера представляет собой обычный электродвигатель постоянного тока. Преобладают электродвигатели с 6-ю полюсами. Доступные сегодня магнитные материалы позволили разработать стартеры, стойкие к демагнетизации и имеющие высокоэффективный магнитный поток, обеспечивающий большую пусковую мощность. Поскольку магнитное поле создается постоянным магнитом, а обратный эффект магнитного поля якоря очень мал, то возбуждение оказывается практически постоянным во всем диапазоне работы.

Редуктор

Цель разработки стартера – свести к минимуму массу и размеры путем уменьшения объема электродвигателя и пр. Одновременно с тем, чтобы добиться одинаковой пусковой мощности, требуется более высокая скорость якоря – для компенсации существующего более низкого крутящего момента на якоре. Крутящий момент адаптируется к оборотам коленчатого вала ДВС путем повышения общего передаточного числа «коленчатый вал – якорь стартера». Это достигается с помощью дополнительного редуктора, встраиваемого в стартер. У стартеров легковых автомобилей он обычно имеет форму планетарного механизма. Он состоит из солнечной шестерни, монтируемой на валу якоря, водила с сателлитами и фиксированной коронной шестерни. Прямозубая планетарная шестерня передает крутящий момент якоря через приводной вал стартера на шестерню, свободную от поперечных сил. Здесь высокие обороты якоря (15000–25000 мин$^{-1}$) понижаются в соотношении $i \approx 3 - 6$.

Стандарт – пластмассовая коронная шестерня, изготавливаемая из полиамида, армированного волокном. В зависимости от требований может также использоваться стальная коронная шестерня с дополнительными амортизирующими элементами.

Виды стартерных приводов

Привод стартера обеспечивает зацепление шестерни стартера с зубчатым венцом маховика ДВС. Привод состоит из шестерни, муфты свободного хода, буферной пружины и тягового реле

Тяговое реле

Тяговое реле, используемое в стартере (рис. 3), состоит из корпуса, якоря, магнитного сердечника, носителя контактов (пластины с контактами, контактной пружины), втягивающей и удерживающей обмоток, возвратной пружины и крышки со встроенными контактами. Тяговое реле выполняет две функции:

– выдвигает приводную шестерню над вильчатым рычагом для зацепления с зубчатым венцом маховика;
– переключает электрическую цепь стартера путем подключения и отключения тока.

Чтобы якорь реле обеспечивал перемещение шестерни по всей длине хода, требуется ток порядка 30 А для создания необходимой маг-

Рис. 3. Тяговое реле:
1 – якорь реле; 2 – втягивающая обмотка; 3 – удерживающая обмотка, 4 – магнитный сердечник, 5 – контактная пружина; 6 – контактные болты; 7 – электрическое соединение; 8 – контактная пластина; 9 – вал якоря (разделенный); 10 – возвратная пружина

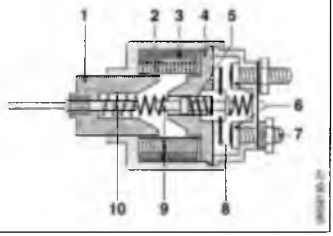


Рис. 4. Цепь тягового реле:
1 – аккумуляторная батарея; 2 – стартер, 3 – выключатель зажигания; 4 – тяговое реле, 4a – втягивающая обмотка, 4b – удерживающая обмотка



нитной силы. Когда якорь реле полностью втянут (воздушный зазор равен нулю), то для удержания якоря в крайнем положении требуется значительно меньшее магнитное возбуждение и, стало быть, меньший ток реле (около 8 А). Обмотка делится на втягивающую и удерживающую части, прежде всего для ограничения нагрева обмотки. Эти две части обмотки подключаются параллельно (рис. 4), что означает сложение магнитного возбуждения двух обмоток. Начало обеих обмоток подключается к контакту 50 тягового реле. Конец втягивающей обмотки подключается через якорь стартера, а конец удерживающей – прямо к нулевому потенциалу.

Когда на контакт 50 тягового реле подается напряжение (зажигание включено), якорь втягивается в корпус магнитной силой, создаваемой втягивающей и удерживающей обмотками. Это движение толкает шестерню посредством рычага привода вперед, к маховику. Лишь когда якорь реле почти полностью втянется внутрь, закроется контактный мост и включится основной ток стартера. Это предотвращает вращение стартера до зацепления шестерни стартера с зубчатым венцом маховика. Поскольку теперь два конца втягивающей обмотки подключены к плюсу, ток течет только к удерживающей обмотке. Меньшей магнитной силы удерживающей обмотки достаточно для надежного удержания якоря реле до размыкания выключателя зажигания.

Стартер с приводом предварительного зацепления

Стартер с приводом предварительного зацепления стал мировым стандартом для легковых автомобилей, так как гарантирует надежную работу во всем рабочем диапазоне. У стартеров с приводом предварительного зацепления ход зацепления составляется из фазы рычажного хода и фазы спирального хода. Якорь тягового реле толкает шестерню стартера к маховику посредством рычага привода (рычажный ход). Поскольку ток стартера еще не включен, шестерня стартера еще не вращается. Если зуб шестерни попадает прямо во впадину между зубьями на маховике (положение «зуб–впадина») при сцеплении шестерни с маховиком, это сцепление происходит настолько быстро, насколько позволяет ход реле.

Если зуб шестерни стартера попадает на зуб на маховике (положение «зуб–зуб») при сцеплении шестерни с маховиком – это происходит примерно в 80 % случаев – якорь реле через рычаг привода растягивает буферную пружину, так как шестерня не может двигаться дальше в осевом направлении.

По достижении крайнего положения, задаваемого тяговым реле, контактный мост якоря реле открывает главный ток стартера, и якорь стартера начинает вращаться. В случае «зуб – впадина» вращающийся электродвигатель полностью вводит шестерню стартера в зацепление с зубчатым венцом маховика посредством спиральной канавки (спиральный ход). Создающая спиральный ход спиральная канавка также обеспечивает передачу шестерней полного крутящего момента электродвигателя только по достижении упора (в конце спирального хода). Это предотвращает механическую перегрузку зубьев шестерни и маховика.

Из положения «зуб–зуб» электродвигатель поворачивает шестерню перед маховиком, пока зуб шестерни не найдет впадину на зубчатом венце маховика. Затем предварительно сжатая сцепляющая пружина толкает вперед шестерню и муфту свободного хода. Вращающийся электродвигатель полностью вдвигает шестерню в зубчатый венец маховика через спиральную канавку.

Когда обмотка реле обесточивается, возвратная пружина толкает якорь реле – а также шестерню и муфту свободного хода через рычаг привода – обратно в исходное положение. Крутящий момент, вызванный трением муфты свободного хода, создает продольную силу вместе со спиральной канавкой, которая помогает выводу шестерни из зацепления.

Буферная пружина значительно уменьшает износ зубьев, ограничивая осевое усилие и, таким образом, продлевает срок службы и повышает надежность системы.

Стартеры со скользящей шестерней

Стартеры со скользящей шестерней используются для запуска крупных двигателей. Поскольку требования к сроку службы обычно значительно выше у грузовых автомобилей, процесс ввода в зацепление обычно происходит в два этапа, чтобы защитить шестерню и зубчатый венец маховика от разрушения. На первом этапе начинается ввод зубьев шестерни стартера в зубчатый венец маховика, а на втором – плавно завершается. Шестерня может поворачиваться механическими или электрическими средствами для устранения положений «зуб–зуб».

Стартеры с инерционным приводом

Инерционный привод – это простейший принцип зацепления, используемый прежде всего для двигателей небольшой мощности (например, у газонокосилок).

При включении стартера ненагруженный якорь начинает свободно вращаться. При этом шестерня стартера и муфта свободного хода еще не вращаются из-за своей инерции и выталкиваются вперед по спиральной канавке. Когда шестерня стартера входит в зацепление с зубчатым венцом маховика, крутящий момент от якоря электродвигателя стартера начинает передаваться на двигатель через муфту свободного хода, шестерню стартера и зубчатый венец маховика. Затем стартер начинает вращать коленчатый вал ДВС.

Когда обороты ДВС обгоняют обороты стартера, муфта свободного хода разъединяет нежелательное соединение. Крутящий момент, вызванный трением муфты свободного хода, создает продольную силу вместе со спиральной канавкой, которая выводит шестерню стартера из зацепления с зубчатым венцом маховика. Выполнению этой операции помогает пружина.

Единственная задача реле электродвигателя у стартеров с муфтой свободного хода – включение пускового тока. Таким образом, ее не нужно монтировать на стартер – ее можно установить в любом положении в автомобиле или в системе привода. Отсутствие буферной пружины значительно увеличивает износ зубьев и, таким образом, уменьшает срок службы и надежность системы запуска.

Муфта свободного хода

В стартере любой конструкции крутящий момент передается через обгонную муфту (муфту свободного хода). Эта муфта устанавливается между стартером и шестерней. Ее задача – вращать шестерню стартера, когда он проворачивает коленчатый вал ДВС, и затем разорвать соединение между шестерней и валом привода, как только обороты ДВС превысят обороты стартера.

В описанных здесь конструкциях стартеров обычно используются роликовые муфты свободного хода. Роликовая муфта свободного хода состоит из приводного механизма с оболочкой муфты, канавки для роликов, роликов, пружин, шестерни, вала шестерни со спиральной канавкой и торцевой заглушки. Роликовая муфта свободного хода толкает отдельные подпружиненные ролики в клинообразные карманы (рис. 5).

Когда приводится вал якоря, цилиндрические ролики зажимаются в сужающейся секции канавки и создают неположительное соединение между внутренним валом и приводным механизмом.

Когда обороты ДВС обгоняют обороты стартера, под воздействием пружин сжатия ролики освобождаются и перемещаются в расширяющуюся секцию канавки. Зажимающая неположительная сила исчезает практически полностью. Подпружиненные ролики создают фрикционный момент.

Включение стартера

Традиционное управление

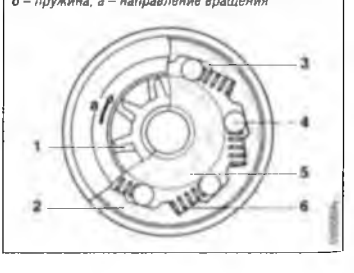
При традиционном запуске водитель подключает напряжение аккумуляторной батареи (ключ зажигания в положении запуска) к реле стартера. Ток реле (около 30 А у легковых автомобилей, около 70 А у грузовых) создает в реле определенную мощность. Она толкает шестерню стартера к зубчатому венцу маховика и активирует первичный ток стартера (200–1000 А у легковых автомобилей, около 2000 А у грузовых).

Стартер выключается при размыкании выключателя зажигания, прерывающем подачу напряжения на реле стартера.

Автоматические системы пуска двигателей

Высокие требования к двигателям в плане комфорта, безопасности, качества и акустики привели к распространению автоматических систем пуска двигателей. Автоматическая система пуска двигателя отличается от традиционной дополнительными компонентами (рис. 6): это одно или несколько балластных

Рис. 5. Муфта роликового типа:
1 – шестерня; 2 – внешняя обойма муфты; 3 – канавка для роликов; 4 – ролик; 5 – вал шестерни; 6 – пружина, а – направление вращения



реле, а также аппаратные и программные компоненты (например, ЭБУ двигателя) для управления запуском.

Водителю больше не нужно непосредственно контролировать ток реле стартера; ключ зажигания используется для отправки сигнала на блок управления, который затем выполняет серию проверок перед началом запуска. Проверки могут быть разными, например:

- проверка полномочий водителя на запуск двигателя (противоугонная);
- проверка выключенного состояния ДВС (предотвращает зацепление шестерни стартера с зубчатым венцом вращающегося маховика);
- проверка достаточности заряда аккумуляторной батареи (относительно температуры двигателя) для запуска двигателя;
- у автоматических коробок передач – проверка нейтрального положения, у механических коробок передач – проверка состояния муфты сцепления (разомкнута ли муфта).

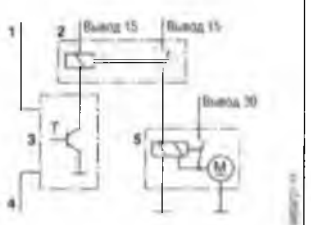
После успешного выполнения проверки блок управления инициирует запуск. При запуске система сравнивает обороты ДВС с оборотами устойчивой работы ДВС (которые могут также зависеть от температуры ДВС). Как только двигатель набирает устойчивые обороты, ЭБУ выключает стартер. Это всегда позволяет максимально сократить время запуска, уменьшить уровень шума и износ стартера.

Этот процесс можно также взять за основу для реализации функции «пуск-стоп», когда ДВС выключается при остановке автомобиля – например, на светофоре, и автоматически заводится, когда это необходимо. В результате значительно экономится топливо, особенно в городском цикле.

Для функции «пуск-стоп» необходима система управления более высокого уровня, система управления электроэнергией с определением заряда аккумуляторной батареи. Могут также потребоваться меры по стабилизации электрической системы автомобиля в фазе запуска для предотвращения неприемлемого падения напряжения. Поэтому система управления и система запуска должны быть согласованы. Уровень и длительность падения напряжения должны быть ограничены, а система управления должна оставаться работоспособной даже при значительном падении напряжения питания.

В то же время ДВС также необходимо оптимизировать для получения быстрой пусковой реакции. Нужен стартер с характеристиками, продлевающими срок службы, гарантирующий более быстрый и менее шумный запуск. Для уменьшения износа и уровня шума необходимо оптимизировать конструкцию шестерни и геометрию зубчатого венца маховика.

Рис. 6. Автоматическая система пуска (электрическая схема):
1 – сигнал пуска от водителя, 2 – балластное реле; 3 – ЭБУ; 4 - сигнал нейтрального положения автоматической коробки передач или разомкнутой муфты механической коробки передач; 5 – стартер



Исполнительные механизмы

Обзор

Функция

Исполнительные механизмы (конечные элементы управления) формируют связь между электрическим сигналом процессора и реальным воздействием. Они преобразуют маломощные сигналы, передающие информацию о расположении элементов исполнения в рабочие сигналы соответствующего для процесса управления энергетического уровня. Конверторы сигнала объединены с элементами усилителя для того, чтобы использовать физические принципы преобразования, управляющие взаимосвязью между различными формами энергии (электрической–механической–жидкостной–тепловой).

Классификация

Исполнительные механизмы классифицируются по типу преобразования энергии. Энергия, получаемая от источника, преобразуется в энергию магнитного или электрического поля, или превращается в тепло. Принцип получения воздействующей силы, определяемый этими формами энергии, основан на использовании силовых полей или некоторых специфических характеристик материалов.

Магнитострикционные материалы делают возможным разработать исполнительные механизмы для применения в диапазоне микроперемещений. К этой категории также относятся пьезоэлектрические исполнительные механизмы, изготавливаемые по многослойной технологии аналогично керамическим конденсаторам, и используются для высокоскоростных топливных форсунок. Тепловые исполнительные механизмы зависят исключительно от характеристик конкретных материалов.

Исполнительные механизмы в автомобиле в основном представляют собой электромагнитомеханические преобразователи и электрические сервоприводы, линейные и роторные электромагнитные исполнительные механизмы. Исключением является пиротехническая система надувания подушек безопасности. Соленоидные исполнительные механизмы могут быть самостоятельными сервоэлементами или выполнять управляющие функции, направляя работу силового устройства (например, гидромеханического).

Электродинамические и электромагнитные преобразователи

Силы в магнитном поле

Различие между электродинамическим и электромагнитным принципами действия исполнительного механизма вытекает из способа создания сил в магнитном поле. Общей для обоих принципов является магнитная цепь, формируемая магнитомягким материалом и катушкой для возбуждения магнитного поля. Главное различие заложено в величине самой силы, создаваемой в устройстве при технически доступных условиях. В одинаковых условиях сила, создаваемая путем применения электромагнитного принципа, оказывается больше в 40 раз. Электрическая постоянная времени для исполнительного механизма этого типа сравнима с механическими постоянными времени. Оба принципа создания сил применяются в механизмах линейного и роторного привода.

Электродинамический принцип

Электродинамический принцип основан на силе, действующей на подвижный заряд или проводник с током в магнитном поле (сила Лоренца, рис. 1, a). Катушка или постоянный магнит генерируют постоянное магнитное поле. Электрическая энергия, предназначенная для получения силы, прикладывается к подвижной обмотке ротора (плунжер или иммерсионная катушка). Высокая точность исполнительного механизма достигается особенностью конструкции обмотки ротора, имеющей малую массу и низкую индуктивность. Два аккумулирующих элемента (один на закрепленном, другой на подвижном компоненте) вырабатывают силы, действующие в двух направлениях через реверсирование тока в обмотках якоря и возбуждения.

Вторичное поле, создаваемое током якоря в разомкнутой магнитной цепи, размагничивает последнюю. Можно сказать, что сила (момент) электродинамического исполнительного механизма примерно пропорциональна току и не зависит от перемещения.

Электромагнитный принцип

Базируется на взаимном притяжении (рис. 1, b) мягких ферромагнетиков в магнитном поле. Электромагнитные исполнительные



Рис. 1. Электродинамические и электромагнитные преобразователи:
a – электродинамический принцип: сила на движущемся заряде $F = B \cdot I \cdot l \sin\alpha$ *(сила Лоренца);*
b – электромагнитный принцип: сила между полюсными наконечниками $F = H^2 A/2\mu_0$

механизмы оснащаются только одной катушкой, создающей поле и потребляющей энергию, идущую на преобразование. Для повышения индуктивности катушка оснащена железным сердечником. Однако, поскольку сила пропорциональна квадрату магнитной индукции, устройство работает только в одном направлении, поэтому требуется возвратный элемент (пружина или магнит).

Динамическая характеристика

Динамическая характеристика или отклик на включение электромеханического привода описывается дифференциальным уравнением для электрических схем и уравнениями Максвелла, по которым определяется зависимость силы тока от перемещения.

Электрическая цепь, как правило, состоит из индуктора с активным сопротивлением. Одним из средств улучшения динамической характеристики является перевозбуждение индуктора в момент активизации, в то время как уменьшение тока может быть ускорено стабилитроном. В любом случае улучшение характеристики достигается за счет дополнительных расходов и потерь в электронных средствах запуска исполнительного механизма.

Диффузия поля является одним из сдерживающих факторов, на который трудно влиять в приводах с высокими динамическими характеристиками. Операции быстрого переключения сопровождаются высокочастотной пульсацией поля в магнитомягком материале магнитной цепи привода. Эти колебания, в свою очередь, наводят вихревые токи (нарастание и затухание магнитного поля). Результирующая задержка в нарастании и уменьшении сил может быть сокращена только выбором материала с низкой электрической проводимостью и проницаемостью.

Конструкция

Выбор конструкции определяется условиями работы (например, требованиями к динамической характеристике).

Электромагнитные исполнительные механизмы

Электромагнитный исполнительный механизм поступательного движения имеет соленоид (рис. 2) с втягивающей силой, уменьшающейся пропорционально квадрату перемещения (рис. 3). Форма кривой определяется типом рабочего зазора (например, конического или иммерсионного якоря).

Роторные электромагнитные исполнительные механизмы характеризуются определенным расположением полюсов в статоре и роторе (например, роторный исполнительный механизм с одной обмоткой, рис. 4). Когда ток прикладывается к одной из катушек, то роторные и статорные полюсы притягиваются и возникает крутящий момент.

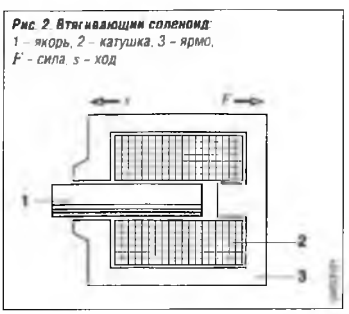


Рис. 2. Втягивающий соленоид:
1 – якорь, 2 – катушка, 3 – ярмо,
F – сила, s – ход

Электродинамические исполнительные механизмы

Куполообразный магнит (исполнительный механизм с иммерсионной катушкой, рис. 5) функционирует, когда цилиндрическая иммерсионная катушка (обмотка якоря) движется в заданном рабочем зазоре.

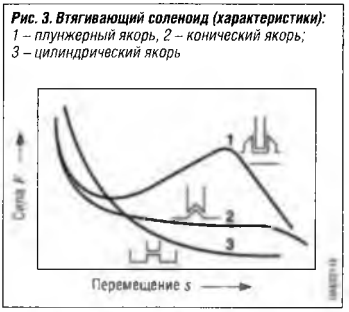


Рис. 3. Втягивающий соленоид (характеристики): *1 – плунжерный якорь, 2 – конический якорь; 3 – цилиндричекий якорь*



Рис. 4. Электромагнитный однообмоточный поворотный исполнительный механизм: *1 – катушка; 2 – статор; 3 – ротор*

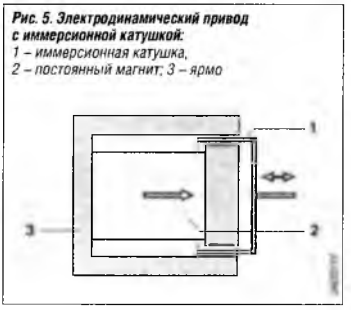


Рис. 5. Электродинамический привод с иммерсионной катушкой: *1 – иммерсионная катушка, 2 – постоянный магнит; 3 – ярмо*

Диапазон перемещения определяется осевым размером обмотки якоря и рабочим зазором.

Применение

Электромеханические исполнительные механизмы являются элементами непосредственного управления; они служат для превращения электрического сигнала в механическое перемещение или работу без какого-либо промежуточного устройства преобразования. Типичное применение – перемещение заслонок, катушек и клапанов. Описываемые приводы не обладают способностью к самовозврату (не имеют устойчивой рабочей точки); они способны выполнять только позиционные операции из постоянного исходного положения (рабочая точка), в том случае, если приложена противодействующая сила (например, возвратная пружина).

Электромагнитный сердечник обеспечивает устойчивую статическую рабочую точку, когда его кривая «сила-ход» накладывается на характеристическую реакцию возвратной пружины. Изменение тока катушки в электромагнитном клапане смещает рабочую точку. Простое позиционирование достигается путем управления током. Однако здесь особое внимание необходимо уделить нелинейности характеристики «сила-ток» и чувствительности системы позиционирования к помехам (например, механическому трению, пневматическим и гидравлическим силам). Температурная чувствительность сопротивления катушки приводит к погрешностям позиционирования, что делает необходимым корректирующее управление током. Высокоточная система позиционирования с хорошей динамической реакцией должна иметь датчик положения и контроллер.

Пьезоэлектрические исполнительные механизмы

Принцип действия

Принцип действия пьезоэлектрических исполнительных механизмов, основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте, открытом в 1880 году братьями Кюри на кристаллах турмалина – преобразовании механической деформации кристалла в напряжение на поверхности кристалла, прямо пропорциональное этой деформации.

Обратный пьезоэлектрический эффект называется непрямым пьезоэлектрическим эффектом. При подаче напряжения на пьезоэлектрический материал происходит быстрая направленная деформация (отклонение) материала на несколько мкм, что можно использовать в качестве активирующего движения.

Необходимым условием для реализации пьезоэлектрического эффекта являются электрические диполи в базисных клетках материала, которые в результате процессов взаимодействия образуют более крупные соединенные области той же ориентации, по аналогии с магнетизмом называемые доменами (рис. 6, a). Когда в привилегированном направлении действует магнитное поле, преобладающая доля этих доменов может быть выстроена в направлении поля, где электрические диполи в доменах одновременно удлиняются (расширение кристаллической решетки, рис. 6, b). Там материал демонстрирует макроскопическую линейную деформацию в процессе поляризации.

Даже после деактивации поля и соответствующего восстановления диполей, домены остаются в этом выстроенном (поляризованном) состоянии (рис. 6, c), так что пьезоэлектрический материал может снова и снова обратимо расширяться в привилегированном направлении при воздействии магнитного поля.

Материалы

Пьезоэлектрические материалы – это подкатегория диэлектриков; иными словами, они являются электрически непроводящими, неметаллическими материалами без свободных мобильных носителей заряда. Наряду с первыми изученными пьезоэлектрическими монокристаллами, такими как турмалин и кварц, стало известно большое количество поликристаллических пьезоэлектрических материалов, включая множество керамических.

В силу небольшой удельной линейной деформации пьезоэлектрических кристаллов, для технического применения пьезоэлектрического эффекта годятся лишь материалы, которые особенно эффективно преобразуют электрическую энергию в механическую. Это свойство можно описать коэффициентом соединения k – отношением механической энергии в пьезоэлементе к общей энергии ($0 < k < 1$).

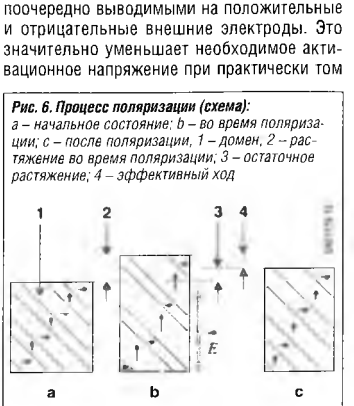
Особую важность для пьезоэлементов представляют керамика PZT (цирконат-титанат свинца) на основе оксидной системы со смешанными кристаллами цирконата-титаната свинца с большим коэффициентом соединения благодаря специфической корректировке соотношения Ti и Zr и использование подходящих диффузантов.

Конструкция

В основе пьезоэлемента лежит поляризованное пьезоэлектрическое твердое тело, в котором может создаваться электрическое поле, необходимое для растяжения пьезоэлемента посредством внешнего контактирования. Для достижения технически приемлемого отклонения этого объемного пьезоэлемента (рис. 7, a), как правило, требуется большая толщина материала и очень высокое напряжение активации – десятки киловольт.

В многослойном пьезоэлементе (рис. 7, b) пьезоэлектрическое твердое тело делится на много параллельно соединенных активных слоев с внутренними электродами, поочередно выводимыми на положительные и отрицательные внешние электроды. Это значительно уменьшает необходимое активационное напряжение при практически том

Рис. 6. Процесс поляризации (схема):
a – начальное состояние; b – во время поляризации; c – после поляризации, 1 – домен, 2 – растяжение во время поляризации; 3 – остаточное растяжение; 4 – эффективный ход



же отклонении всей комбинации. Таким образом, многослойные пьезоэлементы могут работать там, где важна безопасность, при умеренном уровне напряжения ($U < 200$ В) – например, в системах впрыска топлива.

Из-за своей чувствительности к механическому перенапряжению и вредным воздействиям окружающей среды (например, токопроводящая или едкая среда), керамические пьезоэлементы часто устанавливаются в корпусе с определенным начальным механическим напряжением. Это предотвращает любые растягивающие напряжения пьезокерамической структуры и нежелательные взаимодействия со средами даже во время динамической работы исполнительного органа.

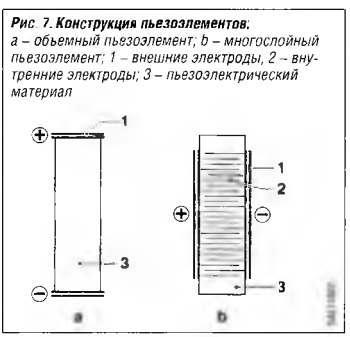


Рис. 7. Конструкция пьезоэлементов:
a – объемный пьезоэлемент; b – многослойный пьезоэлемент; 1 – внешние электроды, 2 – внутренние электроды; 3 – пьезоэлектрический материал

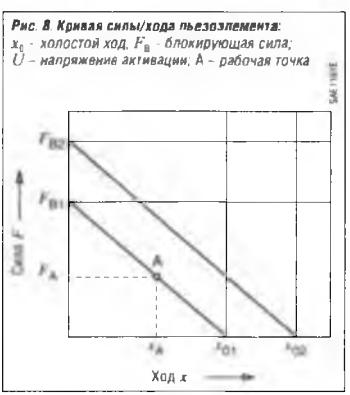


Рис. 8. Кривая силы/хода пьезоэлемента:
x_0 – холостой ход, F_B – блокирующая сила; U – напряжение активации; A – рабочая точка

Энергетическая способность

Как и все электромеханические исполнительные органы, пьезоэлемент также является конвертером – преобразует подаваемую на него электрическую энергию в механическую и таким образом обеспечивает энергию, необходимую для сервоперемещения. Эффективная энергетическая способность зависит от КПД исполнительного механизма, т.е. от величины электрических и механических потерь, возникших в процессе преобразования энергии.

В зависимости от области применения рабочая точка пьезоэлемента может находиться между максимальной (блокирующей) силой и максимальной растягивающей способностью (холостой ход). Основная связь здесь в том, что максимальная коммутирующая сила, которая может быть передана пьезоэлементом в этой рабочей точке зависит от его допустимого отклонения в этой точке в системе. Это поведение описывает кривая силы/хода пьезоэлемента (рис. 8). Из-за пропорциональности между напряжением активации и отклонением пьезоэлемента, а также его силы, эта кривая является прямой функцией напряжения активации. Максимальные значения силы и хода, которые могут быть достигнуты путем их увеличения, ограничены удельной электрической прочностью используемого материала.

Если для конкретной области применения требуется большее усилие пьезоэлемента, то его можно достичь без изменения пьезоэлектрического материала на основании того факта, что активное поперечное сечение пьезоэлемента увеличивается под влиянием электрического поля. С другой стороны, для увеличения хода пьезоэлемента требуется увеличить количество активных слоев в нем. Таким образом, для проектирования многослойного пьезоэлемента под конкретную область применения основными параметрами являются активное поперечное сечение и количество активных слоев пьезоэлемента.

Гидромеханические исполнительные механизмы

Используют сходные принципы по преобразованию и регулированию энергии. Главным различием является используемая среда. Гидравлические исполнительные механизмы работают с практически несжимаемыми жидкостями, обычно маслом, под давлением порядка 30 МПа. В дизельных системах впрыска давление достигает 200 МПа. Пневматические исполнительные механизмы работают со сжимаемыми газами, обычно воздухом, под давлением порядка 1 МПа. Давление у вакуумных исполнительных механизмов составляет порядка 0,05 МПа.

Системы чаще всего строятся на принципах гидростатистических преобразователей энергии. Они выполняют перемещения, преобразуя энергию давления жидкой среды в механическую работу и наоборот.

В противоположность им, гидродинамические преобразователи работают по принципу преобразования энергии потока (кинетической энергии движущейся жидкости) в механическую работу (пример: гидродинамическая муфта).

Потери во время работы являются следствием утечек и трения. Жидкостно-тепловые потери вызываются гидродинамическим сопротивлением, при котором действие дросселя (шайбы, сужающей поток) преобразует гидравлическую энергию в тепло. Часть тепла рассеивается в окружающей среде, а некоторая его часть поглощается и уносится рабочей жидкостью. Это можно описать выражением:

$$Q_{heat} = Q_1 p_1 - Q_2 p_2 .$$

В случае с несжимаемыми жидкостями:

$$Q_{heat} = Q_1 (p_1 - p_2)$$

Турбулентность возникает там, где жидкость протекает через участки ограничений для движения потока (например, через дроссели). Скорость потока среды тогда не зависит в значительной мере от вязкости. С другой стороны, вязкость не играет той роли, как при ламинарном течении в узких трубках и отверстиях.

Гидромеханические усилители (рис. 9) управляют преобразованием энергии из жидкого в механическое состояние. Регулирующий механизм должен конструироваться для управления только относительно малым потоком энергии, необходимым для окончательного позиционирования клапанов.

С помощью переключающих клапанов открывается (закрывается) отверстие, управляющее потоком к (от) гидромеханического преобразователя энергии (рис. 10). При достаточном открытии отверстия дроссельные потери остаются незначительными. Для получения возможности непрерывного управления гидромеханизмом с фактическим отсутствием потерь может использоваться модулированная продолжительность импульса открытия и закрытия. Однако в действительности флуктуации давления и механический контакт между компонентами клапана создают нежелательные шум и вибрацию.

Рис. 9. Гидромеханические исполнительные механизмы



Линейный привод. $F = p_A A$; $s = Q_A / A$

Роторный привод. $M = (p_A V_{th})/2\pi$, $\varphi = (Q_A / V_{th})\ 2\pi$

Рис. 10. Регулирование энергии с помощью 2/2-ходовых клапанов



Жгуты проводов и соединители

Жгуты проводов

Требования

Задача жгутов проводов – распределять питание и сигналы в автомобиле. Жгут проводов в современном легковом автомобиле среднего класса со средним набором оборудования имеет около 750 разных проводов, длина которых достигает 1500 метров (табл. 1). За последние годы количество точек контакта практически удвоилось из-за постоянного роста числа функций в автомобиле. Различают жгуты проводов моторного отсека и кузова. К последнему предъявляются менее жесткие требования в плане температуры, вибрации, агрессивных сред и герметичности.

Жгуты проводов значительно влияют на стоимость и качество автомобиля. При проектировании жгутов проводов необходимо учитывать следующее:

- герметичность;
- электромагнитную совместимость;
- температуру;
- защиту проводов от повреждения;
- прокладку проводов;
- вентиляцию жгута проводов.

Поэтому необходимо привлекать специалистов по жгутам проводов уже на этапе проектирования системы. На рис. 1 показан жгут проводов, разработанный в виде специального приемного модуля. Благодаря оптимизации прокладки и крепления жгутов проводов удалось достичь повышения качества и уменьшить стоимость и массу.

Расчет размеров и выбор материалов

Наиболее важные задачи для проектировщика жгутов проводов:

- расчет поперечных сечений проводов;
- выбор материалов;
- выбор подходящих соединителей;
- прокладка проводов с учетом окружающей температуры, вибраций двигателя, ускорения и электромагнитную совместимость;
- учет среды, в которой прокладывается жгут проводов (топология, этапы сборки при изготовлении автомобиля и оборудование на конвейере).

Таблица 1. Сложность жгутов проводов (типичные значения)

	Компактный автомобиль	Средний класс	Представительский класс
Количество штекерных разъемов	70	120	250
Количество точек контакта	700	1500	3000
Количество проводов	350	730	1500
Общая длина проводки в метрах	700	1500	3200



Рис. 1. Жгут проводов (пример)

Разъем для следующих элементов:

1 – модуль катушки зажигания; 2 – деактивация канала,
3 – топливные форсунки; 4 – дросселирующее устройство,
5 – датчик давления масла,
6 – датчик температуры охлаждающей жидкости двигателя;
7 – датчик температуры всасываемого воздуха,
8 – датчик положения распределительного вала,
9 – клапан продувки корпуса,
10 – датчик давления во впускном трубопроводе,
11 – индикатор зарядного тока;
12 – λ-зонд за каталитическим нейтрализатором;
13 – датчик частоты вращения коленчатого вала,
14 – контакт 50; выключатель стартера;
15 – датчик детонации, 16 ЭБУ двигателя,
17 – масса двигателя,
18 – демонтируемый разъем для жгута проводов двигателя и трансмиссии,
19 – λ-зонд перед каталитическим нейтрализатором,
20 – клапан рециркуляции отработавших газов

Поперечное сечение проводов

Поперечное сечение проводов определяется на основе допустимых значений падения напряжения. Нижний предел поперечного сечения определяется прочностью провода. Общепринятая практика – не используются провода сечением менее 0,5 мм². При наличии дополнительных мер (опоры, защитные трубки, снятие механического напряжения), допускается сечение 0,35 мм².

Материалы

В качестве токопроводящего материала обычно используется медь. Материалы для изоляции проводов определяются температурой, до которой они могут нагреваться. Необходимо использовать материалы, подходящие для длительной работы при высоких температурах. Здесь следует учитывать как окружающую температуру, так и нагрев из-за протекания тока. Используемые материалы – термопластики (например, полиэтилен, полиамид, винилхлорид), фтор-полимеры (например, сополимер этилена с тетрафторэтиленом, фторэтиленпропилен) и эластомеры (например, хлорсульфонил-полиэтилен, кремнийорганическая резина).

Если провода не протягиваются рядом с особенно горячими деталями (например, выхлопная труба, рециркуляция отработавших газов) в топологии двигателя, то одним из критериев выбора изоляционного материала и сечения провода может служить кривая ухудшения параметров при контакте с соответствующим проводом. Кривая ухудшения параметров отображает зависимость между током, вызываемым током ростом температуры и окружающей температурой штекерного соединения. Обычно выделяемое на контактах тепло может отводиться по самим проводам. Следует также заметить, что изменение температуры приводит к изменению модуля эластичности материала контакта (релаксации металла). Можно повлиять на описанные взаимосвязи за счет увеличения сечений проводов и использования проводов подходящего типа и более благородных металлов (золота, серебра) и, соответственно, более высоких предельных температур. При сильно изменяющейся интенсивности тока зачастую полезно измерять температуру контактов.

Соединители электрических проводов и контакты

Тип используемых соединителей электрических проводов и контактов зависит от различных факторов:

- сила тока;
- окружающая температура;
- вибрационная нагрузка;
- стойкость к веществам;
- монтажное пространство.

Прокладка проводов и меры по обеспечению электромагнитной совместимости

Провода следует прокладывать таким образом, чтобы предотвратить их повреждение и обрыв. Это достигается с помощью крепежа и опор. Вибрационная нагрузка на контакты и разъемы уменьшается путем закрепления жгута проводов как можно ближе к разъему и по возможности на одном уровне с вибрацией. Прокладка проводов должна определяться в тесном взаимодействии с проектировщиками двигателя и автомобиля.

При возникновении проблем с электромагнитной совместимостью рекомендуется прокладывать чувствительные провода и провода с импульсами тока с крутым фронтом отдельно. Экранированные провода сложны в изготовлении и поэтому дороги. Кроме того, они требуют заземления. Более дешевым и эффективным способом является скрутка проводов.

Защита проводов

Провода нужно защищать от трения и контакта с острыми краями и горячими поверхностями. Для этого используется клейкая лента. Уровень защиты определяется интервалом и плотностью намотки. Для защиты проводов часто используются гофрированные трубки с необходимыми соединительными фитингами (экономия материала от рифления). Однако фиксирование клейкой лентой все еще является распространенным способом предотвращения перемещений отдельных проводов внутри гофрированной трубки. Оптимальную защиту обеспечивают кабель-каналы.

Жгуты проводов следует защищать от грызунов. Средством защиты могут служить стойкие к прогрызанию экструдированные пластмассовые трубки.

Штекерные соединители

Функции и требования

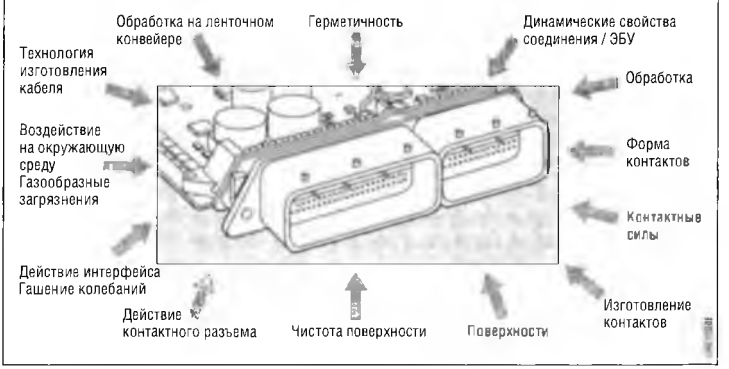
Большая плотность размещения электроники в автомобиле предъявляет высокие требования к штекерным соединителям. Они не только проводят большие токи (например, включение катушек зажигания), но и аналоговые сигналы низкого напряжения с низкой интенсивностью тока (например, сигнальное напряжение датчика температуры охлаждающей жидкости двигателя). В течение срока службы автомобиля штекерные соединители должны обеспечивать надежную передачу сигналов между блоками управления и к датчикам, сохраняя при этом допуски.

Рост требований законодательства в области контроля вредных выбросов и активной безопасности обуславливает все более точную передачу сигналов через контакты штекерных соединителей. При проектировании, размещении и проверке штекерных соединителей нужно учитывать большое количество параметров (рис. 2).

Наиболее распространенной причиной неисправности штекерного соединения является износ контактов из-за вибрации и перепадов температуры. Износ способствует окислению. Это приводит к увеличению омического сопротивления – контакт может, например, подвергнуться тепловой перегрузке. Контактная часть может нагреться выше точки плавления медного сплава. В случае с сигнальными контактами с высоким сопротивлением бортовой контроллер часто обнаруживает неправдоподобный сигнал при сравнении с другими сигналами; в этом случае контроллер переходит в режим неисправности. Эти проблемные моменты в штекерных соединениях определяются бортовой диагностикой (OBD), наличие которой регламентируется законодательством в области контроля выхлопа. Однако диагностировать неисправность контакта на станциях технического обслуживания сложно, так как она отображается как неисправность компонента. Диагностировать неисправность контакта можно лишь косвенно.

Для сборки штекерного соединения на его корпусе имеются различные функциональные элементы, обеспечивающие надежное соединение проводов с обжатыми контактами со штекером. Современные штекерные соединители имеют силу соединения менее 100 Н и способны надежно соединять разъем с интерфейсом компонента или блока управления. Риск неправильного подключения штекерных соединителей к интерфейсу возрастает с увеличением силы соединения. В процессе эксплуатации автомобиля штекерное соединение может разболтаться.

Рис. 2. Параметры, учитываемые при проектировании штекерных соединителей



Типы конструкций

Штекерные соединители имеют разные области применения (табл. 2). Они характеризуются количеством контактов и окружающими условиями. Существуют различные классы штекерных соединителей: с жестким креплением к двигателю, с мягким креплением к двигателю и с креплением к кузову. Еще одним различием является температурный класс места монтажа.

Таблица 2. Использование штекерных соединителей

	Число контактов	Особенности	Области применения
Малое число контактов	1–10	Соединительное усилие не поддерживается	Датчики и исполнительные механизмы (много разных требований)
Большое число контактов	10–150	Поддержка соединительной силы ползуном, рычагом, модулями	Блоки управления (несколько, схожие требования)
Специальные штекеры	любые	Например, встроенная электроника	Особые области применения (отдельные, согласованные требования)

Многоконтактные штекерные соединители

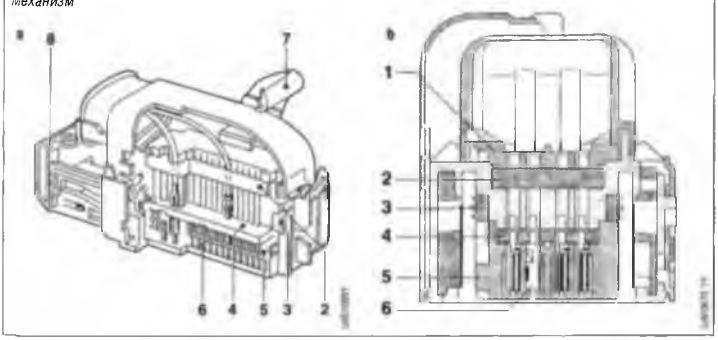
Многоконтактные штекерные соединители используются для всех блоков управления в автомобиле. Они различаются количеством и геометрией контактов (табл. 3). На рис. 3 показана типичная конструкция многоконтактного штекерного соединителя. Имеется периферийное радиальное уплотнение соединения со штыревым разъемом ЭБУ в корпусе соединителя. Собранный микроконтактный соединитель проводов полностью электрически изолирован от штыревого разъема ЭБУ.

От распространения влаги по жилам электрические провода защищены герметизацией за счет обжатия изоляции. Для этого используется силикагелевый или силиконовый мат. Более крупные контакты и провода могут также герметизироваться одиночными уплотнениями (см. «Штекерные соединители с малым числом контактов»).

Таблица 3. Количество и геометрия контактов

		Толщина контактов в мм	
		0,6	0,8
Ширина контакта в мм	0,6	x	
	1,2	x	
	1,5	x	
	2,8		x
	4,8		x

Рис. 3. Многоконтактный штекерный соединитель:
a – общий вид; b – вид в разрезе; 1 – напорная пластина, 2 – плоское уплотнение, 3 – радиальное уплотнение; 4 – стопор (вторичный замок), 5 – держатель контактов; 6 – контакт; 7 – рычаг, 8 – ползунный механизм



При сборке штекера контакт с присоединенным проводом вставляется через плоское уплотнение, уже находящееся в штекере. Контакт сдвигается в свое положение в держателе контактов. Контакт автоматически защелкивается фиксирующей пружиной, сидящей в кольцевой канавке в пластмассовом корпусе штекера. Когда все контакты окажутся на своих местах, для обеспечения вторичной защиты контактов вставляется стопор (вторичный замок). Это дополнительная мера защиты, повышающая удерживающую силу контакта в штекерном соединении. Кроме того, вставка стопора – это способ убедиться, что контакты находятся в правильном положении. Рабочее усилие штекерного соединения уменьшается рычагом и ползунным механизмом.

Штекерные соединители с небольшим числом контактов

Штекерные соединители с небольшим числом контактов используются для исполнительных механизмов (например, топливных форсунок) и датчиков. Их конструкция принципиально аналогична конструкции многоконтактных штекерных соединителей (рис. 4). Рабочее усилие штекерного соединения обычно не подерживается.

Соединение между штекерным соединителем с небольшим числом контактов и интерфейсом герметизируется радиальным уплотнением. Однако внутри пластмассового корпуса провода герметизируются единичными уплотнениями, прикрепленными к контакту.

Системы контактов

В автомобилях используются двухсоставные системы контактов (рис. 5). Внутренняя их часть (токопроводящая) штампуется из высококачественного медного сплава. Она защищается стальной охватывающей пружиной, которая в то же время повышает контактное усилие посредством давящего внутрь пружинного элемента. Защелка, выдавливаемая из стальной охватывающей пружины, входит в зацепление с контактом в пластмассовом корпусе.

Контакты, в зависимости от потребностей, покрываются оловом, серебром или золотом. Для улучшения износостойкости точки контакта используются не только разные покрытия, но и разные структурные формы. Для гашения вибрации проводов в точках контакта в контактную часть встраиваются различные изолирующие механизмы (например, меандрическая прокладка питающих проводов).

Провода обжимаются на контакте. Геометрия обжатия должна быть адаптирована к соответствующему проводу. Для обжатия используются специальные плоскогубцы или полностью автоматические прессы.

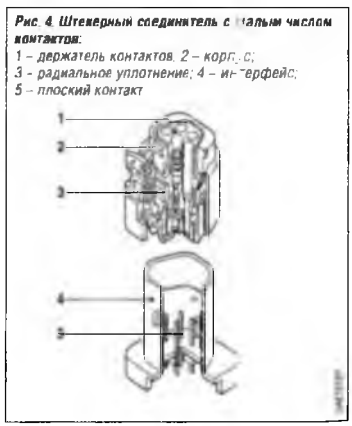


Рис. 4. Штекерный соединитель с малым числом контактов:
1 – держатель контактов; 2 – корпус; 3 – радиальное уплотнение; 4 – интерфейс; 5 – плоский контакт

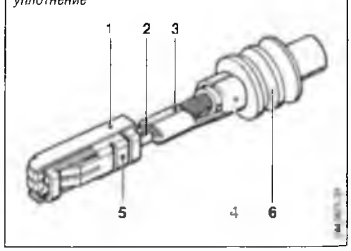


Рис. 5. Контакт:
1 – стальная охватывающая пружина, 2 – одиночный провод; 3 – обжатие проводника; 4 – обжатие изоляции, 5 – меандр; 6 – одиночное уплотнение

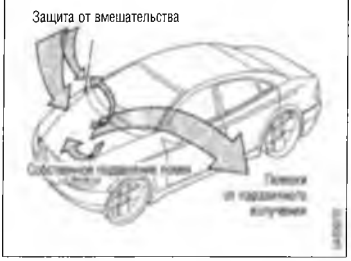
Электромагнитная совместимость и подавление помех

Требования

Термин «электромагнитная совместимость» определяет способность электрической системы сохранять нейтральность вблизи других систем, т.е. она не мешает работе этих систем и те, в свою очередь, не мешают ей. В условиях применения в автомобилях это означает, что различные электрические системы, такие как зажигание, электронный впрыск топлива, антиблокировочная тормозная система, радиоприемник и автомобильный телефон, должны функционировать, находясь в тесной взаимной близости и при этом не создавая взаимных помех работе друг друга (внутреннее подавление помех). Это также означает, что автомобиль как система должен оставаться нейтральным в окружающей его среде, т.е. не должен электрически создавать помех другим автомобилям, радио/ТВ-трансляции и прочим службам и устройствам, работающим на базе радиоприема (помехи от паразитного излучения). В то же время, сам автомобиль должен оставаться полностью работоспособным при воздействии сильных электромагнитных полей – рядом с радиопередатчиками (помехоустойчивость).

С учетом этих требований автомобильные электрические системы и автомобили в целом проектируются для обеспечения электромагнитной совместимости (рис. 1).

Рис. 1. Электромагнитная совместимость в автомобилях



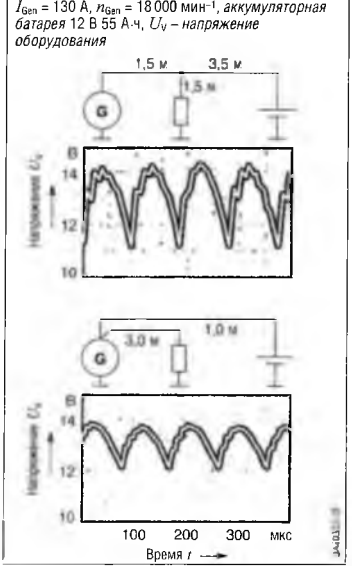
Источники помех

Электрическая система

Пульсации

Генератор питает автомобиль и его электрическую систему выпрямленным трехфазным током. Хотя ток этот довольно плавный и сглаживается аккумуляторной батареей, однако остаточные пульсации все еще остаются. Их амплитуда зависит от нагрузки на электрическую систему автомобиля и проводку (рис. 2), а частота пульсаций изменяется в зависимости от частоты вращения генератора. Основная частота пульсаций лежит в килогерцовом диапазоне. Пульсации могут накладываться на автомобильную звуковоспроизводящую систему непосредственно (гальваническим путем) или индуктивно, где их присутствие воспринимается как шум в громкоговорителях.

Рис. 2. Влияние конструкции автомобильной электрической системы на пульсации напряжения *Например,* I_{Gen} = 130 А, n_{Gen} = 18 000 мин$^{-1}$, *аккумуляторная батарея* 12 В 55 А·ч, U_V – *напряжение оборудования*



Импульсы

Импульсы помех образуются, когда в автомобиле происходит включение или выключение электрического оборудования. Эти импульсы воспринимаются смежными системами непосредственно через систему подачи питания или косвенно как эффект наведения. Если источник помех и система, которая воспринимает импульс помехи, не согласованы друг с другом, это может привести к ложным срабатываниям и даже к разрушению смежных систем.

Импульсы, возникающие в автомобиле, могут быть классифицированы по пяти основным группам. Во избежание возникновения в электрической системе автомобиля неприемлемых ситуаций необходимо найти оптимальное решение, чтобы сделать источники помех совместимыми с устройствами, чувствительными к помехам.

Амплитуды пульсации (разные у систем на 12 и 24 В) делятся на категории. При определении допустимого уровня излучаемых помех, источников пульсации и необходимой устойчивости чувствительных устройств производится классификация всех источников помех в автомобиле как минимум на одну категорию ниже, чем все чувствительные устройства (например, блоки управления), включая отношение сигнала к помехам. Выбор категории подавления помех производится согласно мерам, направленным либо на подавление источников помех, либо на защиту чувствительных устройств.

Высокая частота

Операции по переключению и текущие передачи данных наводят во многих компонентах высокочастотные внутренние колебания. Эти колебания воздействуют на цепи компонентов – особенно линии подачи питания – и возвращаются в автомобильную систему электрооборудования, куда они поступают с различной степенью ослабления интенсивности.

Независимо от того, является ли измеряемый спектр помех непрерывным или совокупностью отдельных кривых, следует ясно представлять разницу между двумя видами источников помех: широкополосные источники помех (электродвигатели – стеклоочистителей, вентиляторов, топливного насоса, генератора и разных электронных компонентов) или узкополосные источники помех (блоки управления с микропроцессорами). Эта классификация зависит от ширины диапазона используемого измерительного прибора относительно характеристик сигнала (рис. 3).

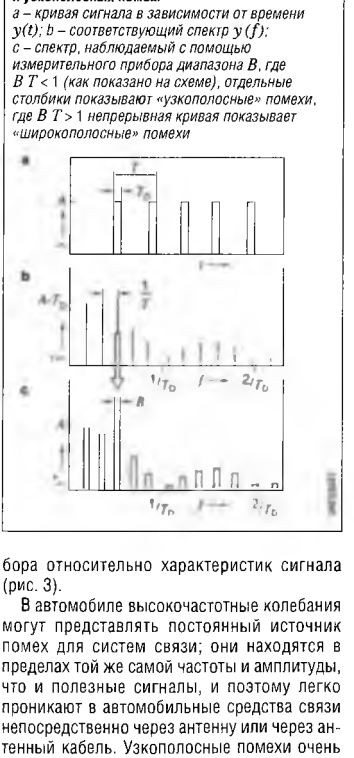


Рис. 3. Источники широкополосных и узкополосных помех:
a – кривая сигнала в зависимости от времени $y(t)$; b – соответствующий спектр $y(f)$; c – спектр, наблюдаемый с помощью измерительного прибора диапазона B, где $BT < 1$ (как показано на схеме), отдельные столбики показывают «узкополосные» помехи, где $BT > 1$ непрерывная кривая показывает «широкополосные» помехи

В автомобиле высокочастотные колебания могут представлять постоянный источник помех для систем связи; они находятся в пределах той же самой частоты и амплитуды, что и полезные сигналы, и поэтому легко проникают в автомобильные средства связи непосредственно через антенну или через антенный кабель. Узкополосные помехи очень критичны, поскольку их характеристики сигнала очень похожи на спектр передатчиков.

Для источников широкополосных помех, таких как электрические двигатели, вентиляторы и т.п., определяются излучаемые помехи на основе паразитных напряжений в питающих проводах в стандартизированных испытаниях. Они также частично оцениваются по стандарту CISPR 25 или DIN/VDE 0879-2 посредством антенных измерений в безэховых камерах с высокочастотными поглотителями. Классификация напряжений помех и напряженностей полей помех, вызванных уровнями подавления помех, определяемых этими стандартами, упрощают электромагнитную совместимость

источников помех и чувствительных устройств, относящихся к оригинальному оборудованию автомобиля (табл. 1 и 2).

Если уровень помех, изначально одобренный для оригинального оборудования автомобиля, оказывается слишком высоким при модифицировании дополнительных систем связи, это ограничивает меры по подавлению помех.

Если источник помех запитывается непосредственно от выводов 15 или 30, тогда помехам можно противостоять посредством помехоподавляющих конденсаторов и фильтров, наиболее подходящих для применения в автомобилях. Конденсаторы обычно подсоединяются непосредственно к выводу источника и на массу. Помехи от проводников тока могут быть уменьшены посредством экранирования, с коротким заземлением оплетки на обоих концах.

Если источником помех управляет ЭБУ, то обычно запрещается модифицировать проводку, идущую к источнику помех, т. к. это может привести к изменению коммутирующего отклика ЭБУ.

Синхронизирующие сигналы от микропроцессоров в ЭБУ действуют подобно источникам узкодиапазонных помех. Обычно модифицирование системы подавления помех этими компонентами невозможно. Излучаемые помехи можно минимизировать, насколько это возможно, соответствующими схемами и устройствами (например, помехоподавляющими конденсаторами) и подходящим расположением компонентов электропроводки. Если этих мер по подавлению помех недостаточно, то нужно попытатья разрешить ситуацию путем оптимизации электрической системы, выбора наилучшего положения для антенны и прокладки антенного кабеля.

В лабораторных условиях оценка реагирования электронных компонентов на помехи включает использование метода электропроводящей линии (например, путем измерения

Таблица 1. Допустимые уровни подавления помех в дБмкВ в отдельных диапазонах частот по DIN/VDE 0879, часть 2, или CISPR 25 для широкополосных источников помех, измеренных квазипиковым детектором (B), и для узкополосных источников помех, измеренных пиковым детектором (S)

Уровни подавления помех	Уровень помех											
	0,15 – 0,3 МГц (ДВ)		0,53 – 2,0 МГц (СВ)		5,9 – 6,2 МГц (КВ)		30 – 54 МГц		68 – 87 МГц		76 – 108 МГц (FM)	
	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c
1	100	90	82	66	64	57	64	52	48	42	48	48
2	90	80	74	58	58	51	58	46	42	36	42	42
3	80	70	66	50	52	45	52	40	36	30	36	36
4	70	60	58	42	46	39	46	34	30	24	30	30
5	60	50	50	34	40	33	40	28	24	18	24	24

Таблица 2. Допустимые уровни напряжённости поля помех в дБмкВ в отдельных диапазонах частот по DIN/VDE 0879, часть 2, или CISPR 25 для широкополосных источников помех, измеренных квазипиковым детектором (B), и для узкополосных источников помех, измеренных пиковым детектором (S)

Уровни подавления помех	Напряженность помех поля																	
	0,15 – 0,3 МГц (ДВ)		0,53 – 2,0 МГц (СВ)		5,9 – 6,2 МГц (КВ)		30 – 54 МГц		68 – 87 МГц		76 – 108 МГц (FM)		142 – 175 МГц		380 – 512 МГц		820 – 960 МГц	
	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c
1	83	61	70	50	47	46	47	46	36	36	36	42	36	36	43	43	49	49
2	73	51	62	42	41	40	41	40	30	30	30	36	30	30	37	37	43	43
3	63	41	54	34	35	34	35	34	24	24	24	30	24	24	31	31	37	37
4	53	31	46	26	29	28	29	28	18	18	18	24	18	18	25	25	31	31
5	43	21	38	18	23	22	23	22	12	12	12	18	12	12	19	19	25	25

уровня помех на линиях питания) или измерения антенн в безэховых камерах. Окончательное мнение, касающееся приема (посредством радио или подвижных средств связи) в автомобиле, зависит от измерений помех в кабеле антенны, проводимых со стороны приемного устройства. Это вынуждает прибегнуть к специальной измерительной цепи, чтобы сопоставить испытуемое полное входное сопротивление приемника измерителя с сопротивлением приемного устройства автомобиля. Для получения реалистичных результатов испытаний применяется настоящая антенна в начальном положении установки. Такие измерения, для того чтобы изолировать их от внешнего электромагнитного передатчика и сигналов помех, проводятся в экранированных камерах электромагнитного излучения, оснащенных высокочастотными поглотителями.

Автомобиль как источник помех

В автомобиле в целом основным источником возникновения помех является работа системы зажигания. Уровни электромагнитного излучения, которые могут испускаться, определяются законодательными актами (Директива 95/54/EC). Директива нацелена на обеспечение радио- и телеприема без создания помех в других автомобилях и в близлежащих зданиях. Максимальные пределы определяются и для широкополосных, и для узкополосных помех (рис. 4).

Уровни, определенные в Директиве, являются минимальными требованиями. Простого следования ЕЭК 10 недостаточно для автомобилей, которые оснащены системами связи. По этой причине нужно улучшать подавление помех для каждого конкретного типа автомобилей, чтобы достичь приемлемого радиоприема у автомобильных систем – магнитолы, мобильного телефона и пр. Излучаемые помехи систем зажигания можно уменьшить путем использования подходящих подавляющих компонентов (таких как резисторы в катушках зажигания или высоковольтные разъемы) и резистивных свечей зажигания. Может потребоваться частичное или полное экранирование системы зажигания на автомобиле, оснащенном двусторонней радиосвязью. Такие меры подавления помех могут повлиять на питание системы зажигания. Поэтому в таких случаях необходимо проведение подробного анализа целесообразности принимаемых мер.

Потенциально чувствительные устройства

Электронные блоки управления являются чувствительными к помехам, распространяющимся к системе извне. Помехи появляются от соседних систем в пределах одного автомобиля или от источников, находящихся в их непосредственной близости (например, создаваемые мощными радиовещательными передатчиками). Неправильные срабатывания начинают появляться в точке, где система теряет способность делать различие между помехой и полезным сигналом.

Возможность принятия эффективных мер зависит от характеристик полезных и паразитных сигналов. Блок управления не может отличить полезные сигналы от паразитных, если характеристика паразитного сигнала схожа с характеристикой полезного. Это имеет место, к примеру, когда паразитный сигнал по форме импульсов имеет ту же частоту, что и сигнал датчика частоты вращения колеса. Особенно критичными здесь являются частоты, близкие частоте ($f_S \approx f_N$) и в том же диапазоне, что и некоторые из гармоник полезной частоты.

Немодулируемые (или модулируемые по звуковой частоте) синусоидальные высокочастотные сигналы (напряженности полей передатчиков) могут демодулироваться в pn-переходах электронных схем. Это может привести к сдвигам уровня, вызванным компонентами постоянного тока, или к наложению переходных паразитных сигналов

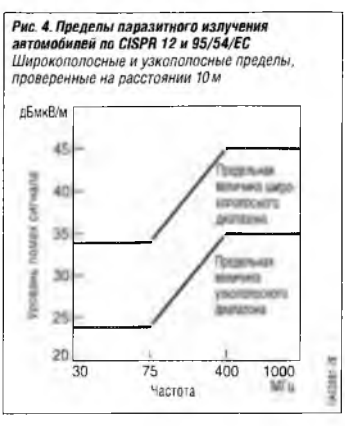


Рис. 4. Пределы паразитного излучения автомобилей по CISPR 12 и 95/54/EC
Широкополосные и узкополосные пределы, проверенные на расстоянии 10 м

в результате демодуляции звукочастотных компонентов в паразитном сигнале. Обычно несущая частота кратна полезным частотам ($f_{S,\ HF} >> f_N$). Звукочастотные компоненты в паразитном сигнале будут особенно критичны, если его частота близка частотам полезных сигналов ($f_{S\ NF} = f_N$). Паразитные сигналы на гораздо более низких частотах, чем у полезных сигналов ($f_S << f_N$), могут также привести к сбоям из-за интермодуляции.

Защита от помех электромагнитных полей определена директивой 95/54/ЕС. Она определяет уровни напряжённости полей, от которых автомобиль должен быть гарантированно защищен, а также требования к излучаемым помехам и минимальные требования. На практике производители и поставщики автомобилей обеспечивают значительно более высокие уровни помехоустойчивости.

Передача помех

Сигналы от источников помех проникают в чувствительные устройства любым из трех возможных путей.

Гальваническая связь

Непосредственная (гальваническая) связь имеет место, когда источник и устройство подвергаются помехе на части общего пути прохождения электрического тока (условие, которого едва ли возможно избежать при общем источнике питания). Жгут проводов автомобиля должен проектироваться с минимально возможным уровнем гальванической связи. Какая именно структура – параллельная, последовательная или многоточечная – будет наиболее оптимальной для питающих проводов, зависит от интенсивности тока, диапазона частот, сопротивления компонентов и общей конструкции подключенной системы.

Пересечение

Помехи пересечения имеют место на соединительных линиях, прокладываемых параллельно от источника помех к устройству, подверженному влиянию помех (рис. 6). В этой модели напряжение U_b, подключаемое к чувствительному устройству, вычисляется по приведенной ниже формуле со следующими параметрами:

$$k = \frac{C}{C_0};\quad k_a = \frac{C_a + C}{C_0};\quad k_b = \frac{C_b + C}{C_0}$$

$$C_0 = \sqrt{C_a\ C_b + C\ (C_a + C_b)};$$

$$\gamma\, l = j(\omega/c)\, l;\ W = 1/(c\ C_0);$$

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света).

U_b состоит из двух частей: ёмкостного компонента, зависящего от напряжения U, и индуктивного компонента, зависящего от тока I. Если длина волны помехи является большей, чем длина проводника l, тогда уравнение упрощается до следующего вида:

$$U_b \approx k\,\gamma\, l \left(\frac{U(R_1 R_2)}{(R_1 + R_2)} - \frac{W\, I\, R_2}{(R_1 + R_2)} \right)$$

Это показывает, что пересечение можно свести к минимуму, чем короче длина l, и чем меньше стандартизированная ёмкостная связь k.

k уменьшается с увеличением расстояния между проводниками. Его можно уменьшить еще больше, закоротив экранирующую оплетку на массу на обоих концах.

Прямая связь

Прямая паразитная связь может произойти, если датчик (S) или исполнительный механизм (A) непосредственно реагирует на электромагнитные поля. Например, если датчиком является приемная антенна, микрофон или магнитная головка кассетного проигрывателя, или если для обнаружения электромагнитного поля он использует тот же принцип. В данном случае необходимо уменьшить эту связь путем увеличения расстояния между источником помехи и чувствительным оборудованием до тех пор, пока помеха не исчезнет.

В случае высоких частот архитектура на печатных платах и интегральные схемы в электронном оборудовании могут вести себя как

$$U_b = \frac{k \cdot R_2 \cdot \sinh(\gamma \cdot l)}{(R_1 + R_2) \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + W\left(k_a + \frac{R_1 \cdot R_2}{W} k_b\right) \cdot \sinh(\gamma \cdot l)} \cdot \left(\frac{R_1}{W} \cdot U - W \cdot I\right)$$

приемные антенны. Здесь паразитную связь нужно предотвращать путем выбора подходящих компонентов, конструкции и, что самое важное, электромагнитно-совместимой конструкции печатных плат.

Электростатический разряд

Источник потенциальной опасности для компонентов и электронных схем в виде электростатического разряда должен проверяться на электромагнитную совместимость. Таким источником могут быть люди (одежда) или промышленное оборудование. Для борьбы с электростатическими разрядами, с одной стороны, должны применяться специальные технологии, а с другой стороны, оборудование следует проектировать таким образом, чтобы крайне высокие напряжения (до нескольких тысяч вольт), которые могут создаваться электростатическими разрядами, уменьшались до приемлемых уровней.

Методы измерения

В настоящее время нашли использование разнообразные методы испытаний, связанные с измерением помех и помехоустойчивости. В зависимости от используемых методов измерения помех их можно грубо разделить на методы, действующие в диапазоне времени (генераторы импульсов, осциллографы) и действующие в диапазоне частот (генераторы синусоид, тестовые приемники, спектроанализаторы).

В методах измерения уровень помех определяется в виде опорных значений в дБ. Они составляют 1 мкВ для паразитного напряжения, 1 мкВ/м для напряженности электрического поля и 1 мВт для мощности. Это значит, что:

Рис. 6. Модель механизма передачи помех от электромагнитных волн:
1 – проводник, вдоль которого распространяется электромагнитная волна, созданная источником радиопомех;
2 – целевой проводник (компонент чувствительного устройства)

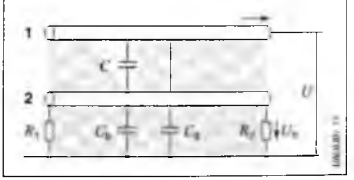


Рис. 5. Модель помех
Электронная система: S – датчики, V_1 – усиление и кондиционирование сигнала; SV – обработка сигнала, V_2 – усиление мощности; A – исполнительные механизмы; паразитный сигнал накладывается на полезный сигнал; (U_1 – U_3) – резистивная связь; (L_1 – L_4) – пересечение на соединительных проводах; (D_1, D_2) – прямое проникновение в датчик и исполнительный орган



$u^* = 20 \lg U$; u^* в дБ, U в мкВ.
$e^* = 20 \lg E$; e^* в дБ, E в мкВ/м.
$p^* = 10 \lg P$; p^* в дБ, P в мВт.

В технологии измерений параметры (амплитуда импульса и напряженность поля передатчика), используемые для подавления помех, обычно определяются непосредственно (E в В/м; U в В; I в А).

Измерения электромагнитной совместимости выполняются для отдельных компонентов, а также для системы в лабораторных условиях и в самом автомобиле.

Метод лабораторных испытаний

В стандартных условиях для анализа импульсов или напряжений высокочастотных помех, излучаемых устройствами, используются искусственные автомобильные электрические системы.

Стойкость к импульсным помехам проверяется с помощью специальных генераторов, выдающих контрольные импульсы по ISO 7637, часть 2 (табл. 3). Проникновение импульсных помех в сигнальные и управляющие линии воспроизводится с помощью клещей ёмкостной связи по ISO 7637, часть 3.

Паразитные волны, проникающие в жгут проводов электрической системы, имитируются с помощью полосковой линии передачи, ячейки TEM (режим поперечных электромагнитных волн), или BCI (инжекция объёмного тока). При использовании полосового приемника проводка помещается между проводником в форме полоски и основной пластиной. При использовании элемента TEM блок управления и участок электропроводки располагаются под прямыми углами к направлению распространения электромагнитных волн. При использовании метода BCI трансформатор тока возбуждает ток в проводке.

Для более высоких частот (> 400 МГц) проверяемое устройство и монтажный жгут подвергаются излучению с помощью антенн и таким образом непосредственно выдерживаются в электромагнитном поле.

Все эти методы измерения описаны в различных разделах стандарта ISO 11452. Излучаемые помехи измеряются широкополосными антеннами в экранированных безэховых камерах с внутренним поглощающим покрытием, по стандарту CISPR 25.

Таблица 3. Испытательные импульсы по ISO 7637, часть 2 для автомобильных электрических систем на 12 и 24 В

Испытательный импульс	
Форма импульса	Причина
1	Выключить индуктивные нагрузки, например, реле или клапан
2 	Выключить электродвигатели (например, вентилятора), создающие положительное перенапряжение во время работы
3a  3b 	Резкие скачки напряжения при включении
4 	Кривая напряжения питания при запуске двигателя
5	Сброс нагрузки генератора[1]

[1] «Сброс нагрузки» – когда генератор подает большой ток на аккумуляторную батарею, и происходит внезапный обрыв соединения с аккумуляторной батареей

Выбор испытаний для проверки электромагнитной совместимости

Испытания для проверки электромагнитной совместимости, проводимые на электрическом или электронном устройстве, зависят от области применения компонента и его конструкции. Простые электромеханические устройства, не содержащие электронных компонентов, не проверяются на помехоустойчивость с помощью электромагнитных полей. С другой стороны, для устройств, содержащих электронные компоненты, в программах испытаний необходимо предусмотреть ряд индивидуальных испытаний.

Рис. 7. Схема эквивалентной цепи автомобильной электрической системы по DIN/VDE 0879-2
Соединения: P–B – испытуемый блок; A–B – питание; M–B – монитор радиопомех; S – выключатель; B – базовое заземление (лист металла, экран для искусственной сети)



Методики испытания автомобилей

Устойчивость электронных систем к воздействию электромагнитных полей, излучаемых мощными передатчиками, проверяется внутри автомобиля в специальных безэховых камерах. Здесь может имитироваться напряженность электрического и магнитного полей, воздействующих на автомобиль (ISO 11451).

Влияние помех автомобильных электрических и электронных приборов на радиоприем измеряется путем использования высокочувствительных измерительных приемников. Автомобильная антенна устанавливается в первоначальное положение и измерение проводится на входе приемника (CISPR 25).

Правила и стандарты

Подавление помех в автомобиле (защита немобильного, постоянно установленного радиоприема) стало обязательным в Европе с 1972 года (Предписание ЕС ECE 10 / Директива ЕС 72/245/EEC). Начиная с 1.01.1996 г. обязательные законодательные требования появились относительно электромагнитной совместимости (Директива ЕС/ЕЭС) для всех электротехнических изделий и установок, которые продаются на рынке. Для автомобилей действует особая директива ЕС 95/54/EC, заменившая Директиву 72/245/EEC и регламентирующая защиту стационарного радиоприема и устойчивость автомобилей к помехам от электромагнитных полей. В дополнение к нормам, регламентирующим конструкцию выпускаемых автомобилей и компонентов, эта директива также определяет методы и максимальные пределы.

Методы измерения электромагнитной совместимости определяются несколькими немецкими и международными стандартами. Национальные стандарты Германии (DIN/VDE) согласованы с международными стандартами (ISO/IEC-CISPR) и охватывают все аспекты, касающиеся электромагнитной совместимости для автомобилей.

Стандарты

Помехоустойчивость:
ISO 7637-1/-2/-3;
ISO 11451;
ISO 11452;
ISO/TR 10605.

Подавление помех:
DIN/VDE 0879-1/-2;
CISPR 12;
CISPR 25.

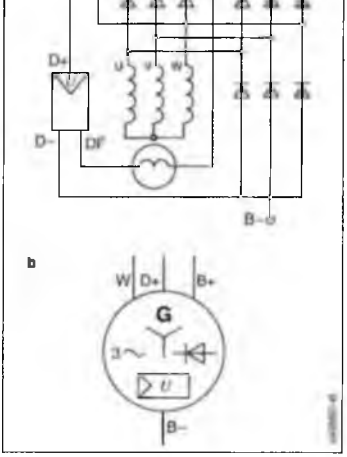
Литература
[1] Reif, K. (Editor): Bosch Fachinformation Automobil – Batterie, Bordnetze und Vernetzung. Vieweg + Teubner, 2010.

Символы и электрические схемы

Электрические системы автомобилей содержат большое количество электрических и электронных устройств для управления двигателем и для систем обеспечения безопасности и комфорта. Обзор сложных цепей автомобильных электрических систем возможен только при наличии понятных символов и электрических схем. Электрические схемы – принципиальные схемы и схемы контактов – помогают при диагностике, упрощают монтаж дополнительных устройств и обеспечивают надежное подключение при модификации автомобильного электрооборудования.

Рис. 1. Электрическая схема и схематический символ генератора с регулятором
В дополнение к символу генератора G схематический символ содержит символы для трех обмоток (фаз), соединения звездой, диодов и регулятора:

a – с внутренней схемой;
b -- схематический символ



Символы электрических схем

Стандарты

Символы электрических схем, показанные в табл. 1, представляют собой подборку стандартизированных символов, подходящих для автомобильной электрики. Но, за редким исключением, они соответствуют стандартам Международной электротехнической комиссии (IEC).

Европейский стандарт «Графические символы для схем» EN 60617 [1] соответствует международному стандарту IEC 617. Он издан в трех официальных версиях (английской, французской и немецкой). Стандарт содержит элементы символов, указательные символы и, самое главное, символы электрических схем для следующих областей:

- общие области применения часть 2;
- проводники и соединительные устройства часть 3;
- пассивные компоненты часть 4;
- полупроводники и электронные лампы часть 5;
- производство и преобразование электроэнергии часть 6;
- коммутационная и контрольная аппаратура и защитные устройства часть 7;
- измерительные приборы, лампы и сигнальные устройства часть 8;
- телекоммуникационное передающее, коммутационное и периферийное оборудование часть 9;
- телекоммуникации, передающее оборудование часть 10;
- архитектурные и топографические монтажные схемы часть 11;
- двоичные элементы часть 12;
- аналоговые элементы часть 13.

Требования

Символы электрических схем – это мельчайшие элементы для упрощенного графического представления электрического устройства или его части. Символы электрических схем показывают принцип работы устройства и функциональные связи технического порядка. Символы электрических схем не учитывают форму и размеры устройства и положение соединений на нем. Обособленное представление на принципиальной схеме возможно лишь абстрактно.

Символы электрических схем должны обладать следующими свойствами: они должны легко запоминаться, быть легко понятными, несложными в графическом отображении и логично вписываться в классификационную группу.

Символы электрических схем состоят из элементов и указательных символов. Вот несколько примеров указательных символов: буквы, цифры, символы, математические знаки и символы, символы единиц измерения и характеристические кривые.

Если электрическая схема становится слишком детальной из-за представления внутренних схем устройства (рис. 1, a) или если не все детали цепи нужны для идентификации функции устройства, то электрическую схему для этого особого устройства можно заменить одним символом (без внутренней схемы) (рис. 1, b).

В случае интегральных схем, обеспечивающих высокую степень экономии пространства (это синонимично высокому уровню интеграции функций в компоненте) предпочтительно упрощенное изображение схемы.

Изображение

Символы схем отображаются без эффекта физического количества, т.е. в обесточенном и механически не активированном состоянии. Рабочее состояние символа схемы, отличающееся от этого стандартного изображения (базового состояния), обозначается двойной стрелкой (рис. 2)

Символы схем и соединительные линии (электрические провода и механические соединения) имеют одинаковую ширину линии.

Во избежание ненужных изгибов и пересечений соединительных линий, можно поворачивать символы схем с шагом 90° или отображать их в зеркально отраженном виде, при условии, что их значение от этого не изменится. Направление непрерывных линий можно выбирать произвольно. Исключениями являются символы схем для резисторов (там символы соединения разрешаются только на узких сторонах) и соединения для электромеханических приводов (где символы соединения разрешаются только на широких сторонах, рис 3)

Соединения могут изображаться и с точкой, и без точки. Если в месте пересечения нет точки, значит нет электрического соединения. Точки соединения на устройствах большей частью не отображаются специфически. Точка соединения, штекер, гнездо или резьбовые соединения обозначаются символами схем лишь в точках, необходимых для монтажа и снятия. Другие места соединения стандартно обозначаются точками.

Контактные элементы с общим приводом обозначаются на монтажной схеме таким образом, чтобы при активации они следовали направлению движения, установленному механическим соединением (– – –) (Рис. 4).

Рис. 2. Рабочее состояние схематического символа отличное от базового:
a – нет контакта;
b – электромеханический привод;
1 – базовое состояние; 2 – отклонение

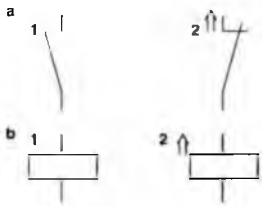


Рис. 3. Оконечные нагрузки:
a – резистор;
b – электромеханический привод

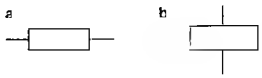


Рис. 4. Механические связи у многопозиционного выключателя:
0, 1, 2 – положения выключателя,
15, 30, 50 – обозначения контактов

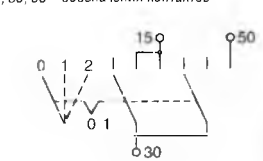


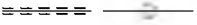
Таблица 1. Выбор схематических символов по EN 60617

Соединения

Электрический провод; пересечение (с соединением и без)



Экранированный провод



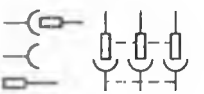
Линии пересечения (с соединением и без)



Точка узла, отдельное соединение (если необходимо делать различие)



Штекерное соединение; штепсельная розетка; электрический разъем; тройное штекерное соединение



Заземление (оборудования/автомобиля)

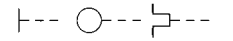


Механические функции

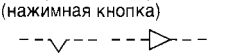
Положения переключателя (основное положение – сплошная линия)



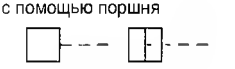
Ручное приведение в действие, приведение в действие со следящим устройством (кулачковый контакт), тепловое расширение (биметаллическая пластина)



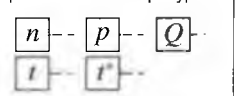
Фиксатор положения неавтоматический и самовозвращающийся в направлении стрелки (нажимная кнопка)



Привод (механический, пневматический, гидравлический) и привод с помощью поршня



Привод от частоты вращения n, давления p, количественной величины Q, времени t и температуры t°



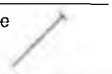
Регулирование несобственное (внешнее)



Регулирование собственное с линейной и нелинейной характеристикой



Регулирование основное

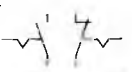


Переключатели

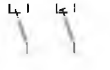
Переключатель мгновенного действия: замыкающий контакт и размыкающий контакт



Переключатель положения: замыкающий контакт и размыкающий контакт без автоматического возврата



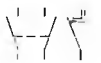
Переключатель полюсов: размыкание перед замыканием и замыкание перед размыканием



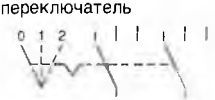
Переключатель с двухсторонним замыкающим контактом и центральным положением «выключено» (например, переключатель сигнала поворота)



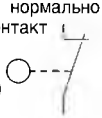
Переключатель с комплектом замыкающих и размыкающих контактов и с контактом двойного замыкания



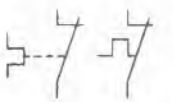
Многопозиционный переключатель



Переключатель, приводимый в действие с помощью кулачка, нормально замкнутый контакт (например, контакты прерывателя)

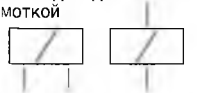


Термостатический переключатель: размыкающее и пусковое устройство

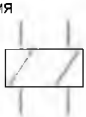


Различные компоненты

Соленоид с одной обмоткой



Соленоид с двумя обмотками, действующими в одном направлении



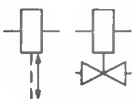
Соленоид с двумя обмотками, действующими в разных направлениях



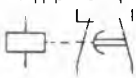
Электротермический исполнительный механизм, электротепловое реле



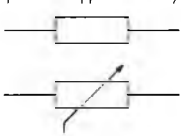
Электромагнитный исполнительный привод: соленоид возвратно-поступательного действия и соленоидный клапан



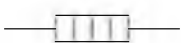
Реле (привод и переключатель)
Пример: контакт без задержки прерывания и контакт с задержкой прерывания



Резистор и потенциометр (с тремя соединениями)



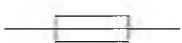
Терморезистор, свеча зажигания, воспламенитель, обогреваемое стекло



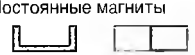
Антенна



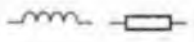
Плавкий предохранитель



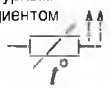
Постоянные магниты



Обмотка (индуктивная)



Резистор с положительным температурным коэффициентом (PTC)



Резистор с отрицательным температурным коэффициентом (NTC)

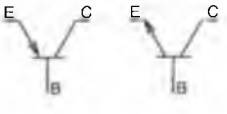


Диод, направление тока – по стрелке в виде треугольника



Транзистор с p–n–p–структурой
Транзистор с n–p–n–структурой

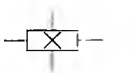
E – эмиттер (стрелка указывает на направление тока)
C – коллектор, положительный
B – база (горизонтальная), отрицательная



Светодиод (LCD)



Датчик ЭДС Холла



Символы устройств

Индикаторный измерительный прибор: общий, вольтметр, часовой механизм



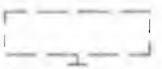
Индикатор частоты вращения, температурный индикатор, индикатор линейной скорости



Пунктирные и штрихпунктирные линии, используемые для разграничения отдельных секций цепей или группирования деталей вместе в целях комплектования одного устройства



Экранированное устройство, штриховая линия соединяется с заземлением



Устройство или элемент цепи (пояснения могут помещаться внутри символа, например уравнения, характеристики, назначение устройства)



Электронный блок управления (ECU) и регулятор



Аккумуляторная батарея



Штепсельная розетка (гнездо контакта)



Источник света, фара



Звуковой сигнал рупорный



Обогреватель заднего стекла



Выключатель без индикаторной лампы



Выключатель с индикаторной лампой



Датчик давления



Реле



Соленоидный клапан, инжекторный клапан (форсунка), клапан холодного пуска



Термовременной выключатель



Выключатель дросселя



Исполнительный механизм вращательного типа



Вспомогательный пневмоклапан с электротепловым исполнительным механизмом



Клапан регулирования давления (системы ABS)



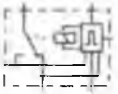
Температурный выключатель, температурный датчик



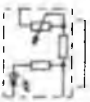
Исполнительный механизм холостого хода



Реле стеклоочистителя периодического действия



Управление яркостью (затемнитель)



Выключатель аварийной сигнализации и сигналов поворота



Свеча зажигания



Катушка зажигания



Одноискровая катушка зажигания



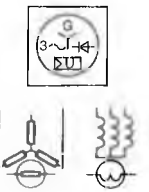
Распределитель зажигания



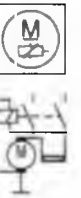
Регулятор напряжения



Генератор переменного тока с регулятором



Мотор стартера с соленоидом включения



Электрический топливный насос и привод гидронасоса



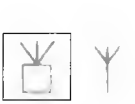
Двигатель с воздухонагнетателем, вентилятор



Двигатель стеклоочистителя



Автомобильный радиоприемник и антенна



Динамик



Датчик сопротивления



Количественный измеритель потока, датчик уровня топлива



Стабилизатор напряжения



Лямбда-зонд (кислородный датчик)

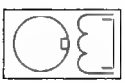




Датчик частоты вращения (системы ABS)



Индуктивный датчик



Датчик линейной скорости движения



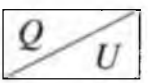
Реле указателя поворота, импульсный генератор, промежуточное реле



Датчик расхода воздуха



Преобразователь (частота, напряжение)



Пьезоэлектрический датчик



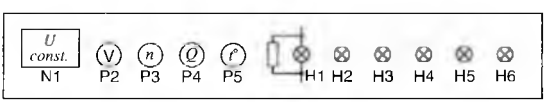
Измеритель массы воздушного потока



Индуктивный датчик



Комбинация приборов (приборный щиток)



Электрические схемы

Электрические схемы – это идеализированные представления электрических устройств в виде символов. К таким схемам также относятся иллюстрации и упрощенные чертежи. С помощью схемы показываются связи между отдельными различными устройствами и способ их подсоединения друг к другу. Электрические схемы могут дополняться таблицами, графиками или описаниями. Вид электрической схемы и ее использование обычно определяются в соответствии с конкретной целью (например, показ работы системы) (рис. 5).

Чтобы электрическая схема была «читаемой», она должна удовлетворять следующим требованиям:

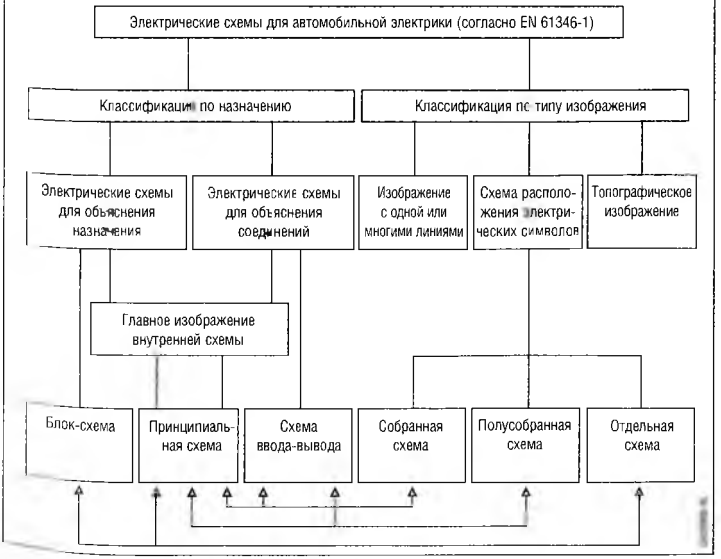
- она должна соответствовать требованиям стандартов, а какие-либо отклонения должны объясняться;
- пути прохождения тока должны располагаться таким образом, чтобы поток проходящих сигналов или механическое действие имели место слева направо и сверху вниз.

В автомобильной электрике блок-схемы без отдельных входов/выходов и внутренних схем позволяют оперативно понять принцип работы системы или устройства. Схематическое отображение различными способами (расположение символов схем) является подробным представлением для определения функции и выполнения ремонта. Схема контактов (с указанием мест расположения контактов устройств) используется службами послепродажного обслуживания при замене или модификации устройств.

В зависимости от способа отображения различают:

- отображение с одной или несколькими линиями и по расположению символов схемы;
- отображение в смонтированном, полусмонтированном виде, обособленное и топографическое отображения, которые могут сочетаться в одной и той же электрической схеме.

Рис. 5. Классификация электрических схем



Блок-схема

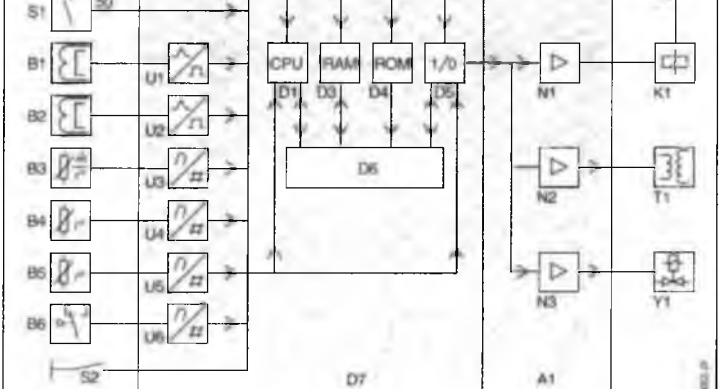
Блок-схема – это упрощенное представление электрической схемы, где учитываются только существенные детали (рис. 6). Она служит быстрым ориентиром для более подробной документации (схематичного представления).

Устройства отображаются в виде квадратов, прямоугольников и кругов с отмеченными на них указательными символами, аналогично EN 60617, часть 2. Линии в большинстве случаев чертятся в виде одиночных линий.

Принципиальная схема

Принципиальная схема является подробной схемой цепи. Четко отображая отдельные пути прохождения тока, она также показывает, как именно работает электрическая схема. В принципиальной схеме, которая упрощает чтение и дает ясное представление о работе цепи, не должно быть противоречий между отдельными компонентами цепи и их пространственными связями. На рис. 7 изображена принципиальная схема стартера в смонтированном и обособленном виде.

Рис. 6. Блок-схема на примере ЭБУ Motronic:
A1 – ЭБУ; B1 – датчик оборотов двигателя; B2 – датчик эталонной отметки; B3 – датчик воздушной массы; B4 – датчик температуры всасываемого воздуха, B5 – датчик температуры двигателя; B6 – выключатель дроссельной заслонки; D1 – вычислительный блок (центральный процессор); D2 – адресная шина, D3 – основная память (RAM); D4 – память программных данных (ROM); D5 – ввод–вывод; D6 – шина данных; D7 – микрокомпьютер; G1 – аккумуляторная батарея; K1 – реле насоса; M1 – электрический топливный насос; N1–N3 – задающие каскады; S1 – выключатель зажигания/стартера; S2 – перекидной выключатель; T1 – катушка зажигания; U1 и U2 – формирователи импульсов, U3–U6 – аналогово-цифровые преобразователи, Y1 – топливная форсунка



Принципиальная схема должна содержать:
- электрическую цепь;
- идентификацию устройств (EN 61346, часть 2, [3]);
- обозначение штырьков и контактов (DIN 72552, [4]).

Принципиальная схема может содержать:
- полное отображение с внутренней схемой для упрощения проверки, диагностики, обслуживания и замены (модификации);
- контрольные обозначения для упрощения поиска символов схем, особенно при обособленном представлении.

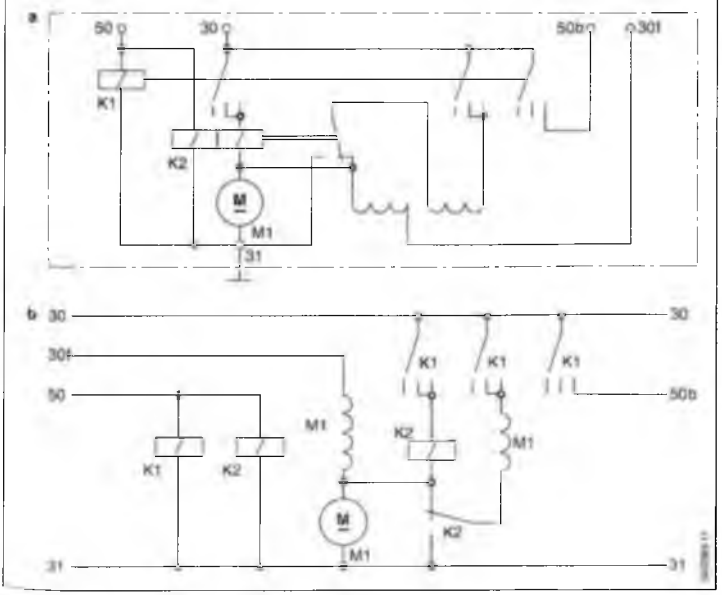
Отображение электрической цепи

В принципиальных схемах в основном используется многолинейное представление. Для символов схем стандарт EN 61346 часть 1 [2] предусматривает следующие способы отображения, которые могут сочетаться в одной и той же схеме.

Монтажная схема

Все детали устройства непосредственно отображаются вместе в смонтированном и подключенном виде двойной косой чертой или пунктирными линиями, определяющими механическую связь. Это отображение можно использовать для достаточно простых схем (рис. 7, а).

Рис. 7. Принципиальная схема электродвигателя стартера типа KB для параллельной работы в двух вариантах представления:
а – монтажная схема; b – представление в обособленном виде; K1 – управляющее реле; K2 – сцепляющее реле, удерживающая обмотка и втягивающая обмотка; M1 – двигатель стартера с обмотками последовательного и параллельного возбуждения; 30; 30f; 31; 50b – обозначения выводов



Представление в обособленном виде
Символы схем для деталей электрических устройств отображаются отдельно и располагаются таким образом, чтобы каждый путь протекания тока можно было отследить как можно проще (рис. 7, b). Пространственное расположение отдельных устройств или их деталей не учитывается. Пути протекания тока должны располагаться как можно более линейно, четко и по возможности без пересечений. Главная цель этого представления – определить функцию электрической цепи.

Связь отдельных деталей должна определяться с помощью системы идентификации, согласно EN 61346, часть 2. Идентификатор устройства располагается на каждом отдельно отображаемом символе схемы для этого устройства. Устройства, отображаемые обособленно, после сборки должны быть обозначены в какой-либо точке на электрической схеме, если это необходимо для понимания электрической схемы.

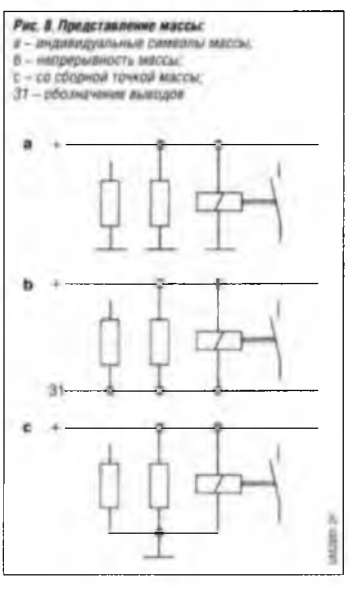


Рис. 8. Представление массы:
a – индивидуальные символы массы;
b – непрерывность массы;
c – со сборной точкой массы;
31 – обозначение выводов

Топографическое представление
В этом представлении положение символов схемы полностью или частично соответствует пространственному расположению в устройстве или детали.

Представление массы
Для большинства автомобилей в силу своей простоты предпочитается однопроводная система, в которой масса (металлические детали автомобиля) служит возвратным проводником. Если идеально проводящее соединение отдельных деталей заземления не гарантируется или если имеет место напряжение более 42 В, то возвратный проводник также прокладывается изолированно от массы.

Все отображаемые на электрической схеме символы массы электрически соединяются между собой через массу устройства или автомобиля.

Все устройства, содержащие символ массы, должны подключаться к массе автомобиля и быть электрически проводимыми.

На рис. 8 показаны различные возможности отображения массы.

Пути протекания тока и провода
Электрические схемы изображаются таким образом, чтобы они читались как можно проще. Отдельные пути протекания тока, предпочтительно в направлении слева направо или сверху вниз, должны проходить параллельно краю электрической схемы, как можно более линейно, по возможности без пересечений и изменения направления.

При наличии нескольких параллельных линий они группируются в пучки по три линии, с промежутками между пучками.

Разделительные и рамочные линии
Разделительные и рамочные линии из точек и тире ограничивают детали электрических схем, чтобы отобразить функциональную или конструктивную связь устройств или деталей.

Линия из точек и тире в автомобильной электрике обозначает непроводящее ограничение устройств или деталей. Она не всегда соответствует корпусу и не используется в качестве массы. В силовых системах эта ограничительная линия часто соединяется с линией, также из точек и тире, обозначающей провод защитного заземления.

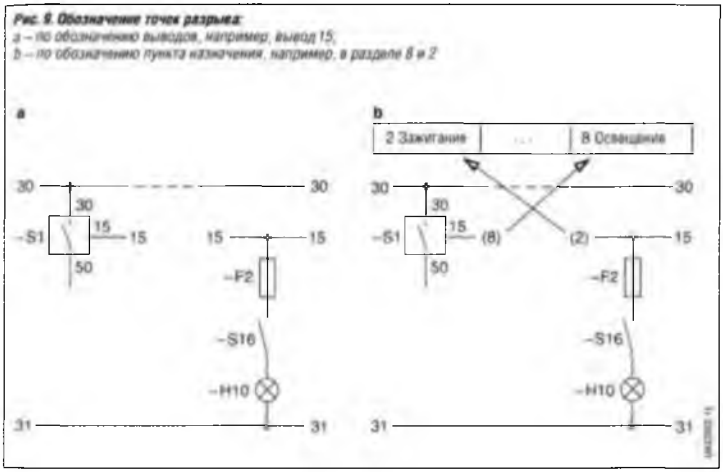


Рис. 9. Обозначение точек разрыва:
a – по обозначению выводов, например, вывод 15;
b – по обозначению пункта назначения, например, в разделе 8 и 2

Точки разрыва, идентификатор, обозначение пунктов назначения

Соединительные линии (провода и механические связи), занимающие большую длину на принципиальной схеме, для большей ясности можно прерывать. Отображаются только начало и конец соединительной линии. Связь этих точек разрыва должна легко определяться. Для этого используются идентификатор и обозначение пунктов назначения.

Идентификатор в связанных точках разрыва совпадает. Идентификатором служат обозначения контактов по DIN 72552 (рис. 9, a), спецификация концепции работы и спецификации в виде буквенно-цифровых символов.

Обозначение пунктов назначения указывается в скобках, чтобы его нельзя было перепутать с идентификатором; оно состоит из номера раздела пункта назначения (рис. 9, b).

Код раздела

Код раздела, указанный в верхней части схемы (раньше он назывался «путь тока») используется для определения местоположения деталей электрической схемы. Это обозначение может принимать три разных формы:

- последовательные числа с одинаковыми интервалами, слева направо (рис. 10, a),
- ссылка на содержание разделов электрической схемы (рис. 10, b)
- либо и то, и другое (рис. 10, c).

Маркировка

Устройства, детали и символы схем идентифицируются на электрических схемах буквой и числом в соответствии с EN 61346, часть 2. Эта маркировка размещается слева от символа схемы или под ним.

Указательный символ, стандартно указываемый для типа устройств, можно опустить, если это не вызовет путаницы.

В случае со встроенными устройствами, одно устройство является составной частью другого, например, стартер со встроенным сцепляющим реле K6. В этом случае обозначение устройства будет таким: – M1 – K6.

Обозначение связанных символов схем при обособленном отображении: каждому отдельно отображаемому символу схемы для

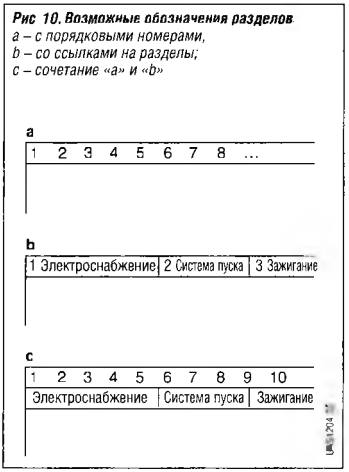


Рис 10. Возможные обозначения разделов
a – с порядковыми номерами,
b – со ссылками на разделы;
c – сочетание «a» и «b»

того или иного устройства дается обозначение, привычное для этого устройства.

Обозначения штырьковых контактов (например, по DIN 72552) должны наноситься снаружи символа схемы, а при наличии ограничительной рамочной линии – предпочтительно с выносом за эту линию.

Там, где пути тока проходят горизонтально: спецификации, относящиеся к отдельным символам схемы, наносятся под ними. Обозначение контактов располагается непосредственно за символами схемы, над соединительной линией.

Там, где пути тока проходят вертикально: спецификации, относящиеся к отдельным символам схемы, наносятся слева от них. Обозначение контактов располагается непосредственно за символом схемы, справа, если формат горизонтальный, и слева рядом с соединительной линией, если формат вертикальный.

Схема выводов

Схема выводов показывает расположение выводов электрических устройств и подключенные внешние и при необходимости внутренние проводные соединения (линии).

Отображение

Отдельные устройства показываются в виде квадратов, прямоугольников, кругов или символов и даже в виде схем с монтажным изображением деталей и могут быть расположены топографически. Для изображения точек вывода используются круг, точка, штекерное соединение или просто линия вывода.

В автомобильной электрике обычно используются следующие способы отображения:

– в смонтированном виде, символы схем по EN 60617 (рис. 11, a).
– в смонтированном виде, с монтажным изображением устройства (рис. 11, b).
– в обособленном виде, изображение устройства с символами схем, выводы с обозначениями пунктов назначения (рис. 12, a); возможна цветовая маркировка проводов.
– в обособленном виде, изображение с монтажным расположением деталей, выводы с обозначениями пунктов назначения

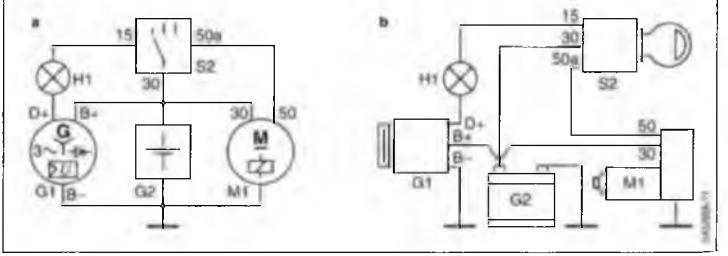


Рис. 11. Пример схемы выводов (монтажная схема):
a – с символами схем;
b – с устройствами

(рис. 12, а); возможна цветовая маркировка проводов.

Маркировка

Устройства маркируются согласно стандарту EN 61346, часть 2. Выводы и штекерные соединители маркируются теми же обозначениями, что нанесены на устройство (рис. 11).

В раздельном методе представления монтажной схемы сплошные соединительные линии отдельных устройств опускаются. Все проводные выводы устройства маркируются обозначением пункта назначения (EN 61346, часть 2), состоящим из идентификатора устройства, к которому идет вывод, и обозначения контакта, при необходимости провод получает цветовую маркировку (рис. 13).

Рис. 13. Обозначение устройства (пример: генератор):
a – обозначение устройства (кодовые буква и число); b – обозначение выводов на устройстве; c – устройство-масса; d – ссылка на пункт назначения (кодовые буква и число / обозначение выводов / цвет провода)

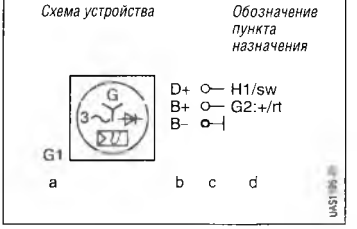
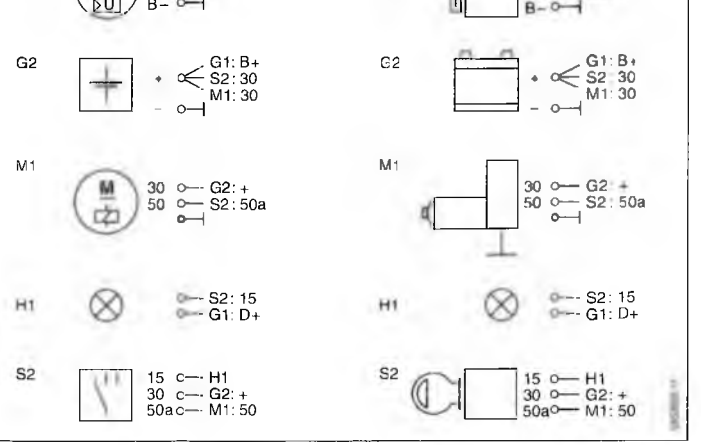


Рис. 12. Схема выводов (в обособленном виде):
a – с символами схемы и обозначениями пунктов назначения;
b – с устройствами и обозначениями пунктов назначения;
G1 – генератор с регулятором; G2 – аккумуляторная батарея; H1 – индикатор генератора, M1 – двигатель стартера; S2 – выключатель зажигания/стартера; XX – масса устройства – масса автомобиля; YY – выводы для подключения массы; 15 – потенциал линии, например, вывод 15



Монтажная схема

Фирмой Bosch разработаны специальные принципиальные схемы для диагностики сложных и сильно разветвленных систем с функцией самодиагностики. Монтажные схемы Bosch для различных систем в большом количестве легковых автомобилей можно найти в ESI[tronic] (Bosch Electronic Service Information). Это позволяет авторемонтникам быстро диагностировать неисправности и подключать модифицированное оборудование. На рис. 15 показан пример монтажной схемы системы запирания дверей.

В отличие от обычных принципиальных схем, монтажные схемы требуют определенных символьных обозначений (рис. 14). Они включают в себя коды компонентов – например, A28 (противоугонная система), перечисленные в табл. 2, и расшифровку цветовых маркировок (табл. 3). Обе таблицы можно открыть в ESi[tronic].

Рис. 14. Дополнительные описания на монтажных схемах:
1 – цвет провода; 2 – номер разъема; 3 – номер штырька (косая черта между штырьками означает, что все они относятся к одному разъему)

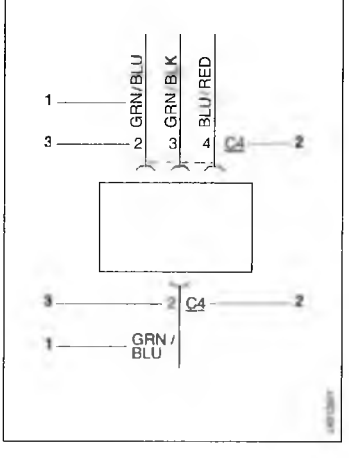


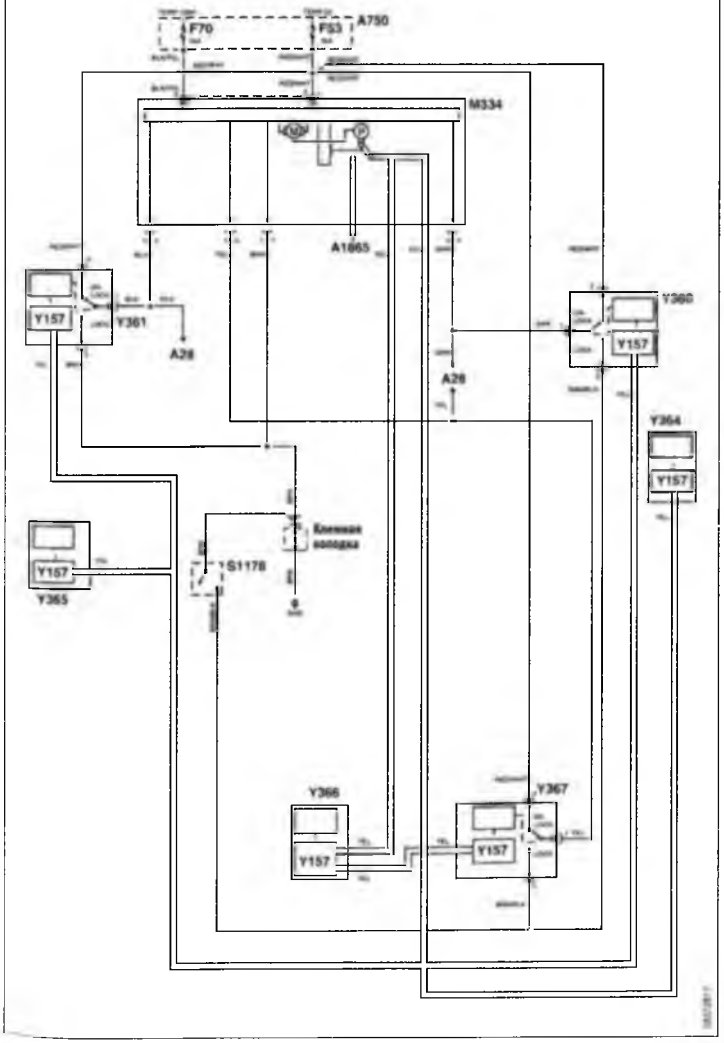
Таблица 2. Расшифровка кодов компонентов

Положение	Обозначение
A1865	Электрически регулируемые сиденья
A28	Противоугонная система
A750	Блок плавких предохранителей, блок реле
F53	Плавкий предохранитель C
F70	Плавкий предохранитель A
M334	Подкачивающий насос
S1178	Выключатель звукового сигнала
Y157	Вакуумный привод
Y360	Привод, правая передняя дверь
Y361	Привод, левая передняя дверь
Y364	Привод, правая задняя дверь
Y365	Привод, левая задняя дверь
Y366	Привод, крышка заливной горловины
Y367	Привод, замок багажного отделения, крышка багажника, задняя дверь

Таблица 3. Расшифровка цветов проводов

Положение	Обозначение
BLK	черный
BLU	синий
BRN	коричневый
CLR	прозрачный
DK BLU	темно-синий
DK GRN	темно-зеленый
GRN	зеленый
GRY	серый
LT BLU	голубой
LT GRN	светло-зеленый
NCA	цвет неизвестен
ORG	оранжевый
PNK	розовый
PPL	бордовый
RED	красный
TAN	желто-коричневый
VIO	фиолетовый
WHT	белый
YEL	желтый

Рис. 15. Пример монтажной схемы системы запирания дверей



Монтажные схемы делятся на схемы систем (см табл. 4), Классификация электрических схем отражает стандартную практику ESI[tronic], используемую для других систем, согласно которой они относятся к одной из четырех монтажных групп:

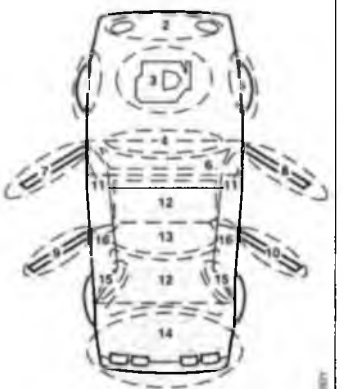
- двигатель;
- кузов;
- шасси/подвеска;
- трансмиссия.

Таблица 4. Системные схемы

1	Управление двигателем
2	Запуск/зарядка
3	Кондиционирование/вентиляция/отопление (HVAC)
4	Вентилятор радиатора
5	ABS
6	Круиз-контроль
7	Приводы стеклоподъемников
8	Центральная система блокировки
9	Панель приборов
10	Система стеклоомывателей/стеклоочистителей
11	Фары
12	Внешнее освещение
13	Автомобильные системы электрооборудования
14	Масса
15	Линия данных
16	Блокировка смещения
17	Противоугонная система
18	Системы пассивной безопасности
19	Антенна с электроприводом
20	Система сигнализации
21	Обогреваемые ветровое стекло / зеркала
22	Дополнительные системы безопасности
23	Внутреннее освещение
24	Усилитель рулевого управления
25	Регулятор зеркал
26	Управление складным верхом
27	Звуковой сигнал
28	Багажник, задняя дверь
29	Система регулировки сидений
30	Электронная амортизация
31	Прикуриватель, гнездо
32	Навигационная система
33	Трансмиссия
34	Активные компоненты кузова
35	Гашение вибраций
36	Мобильный телефон
37	Автомобильная акустическая система, Hi-Fi
38	Иммобилайзер

Рис. 16. Точки заземления:

1 – переднее левое крыло,
2 – передняя часть автомобиля;
3 – двигатель;
4 – щиток передка;
5 – переднее правое крыло;
6 – перегородка педального узла / приборного щитка;
7 – передняя левая дверь;
8 – передняя правая дверь;
9 – задняя левая дверь;
10 – задняя правая дверь;
11 – передние стойки;
12 – пол кузова,
13 – крыша;
14 – задняя часть автомобиля;
15 – задние стойки,
16 – средние стойки



Важно знать точки заземления, особенно при установке дополнительных аксессуаров. По этой причине в ESI[tronic], помимо монтажных схем, содержится схема точек заземления в автомобиле (рис. 16).

Обозначения для электрических устройств

Обозначения в соответствии с EN 61346 часть 2 (таблица 5) используются для обеспечения ясной и всем понятной идентификации систем, деталей и пр., изображаемых символами на электрических схемах. Они отображаются рядом с символами схем и состоят из серии определенных указательных символов, букв и цифр (рис. 17).

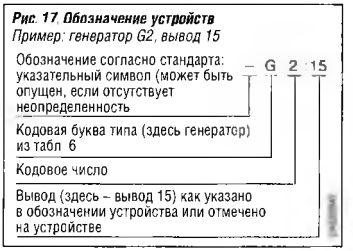


Рис. 17. Обозначение устройств
Пример: генератор G2, вывод 15

Таблица 5. Кодовые буквы для обозначения электрических устройств по EN 6146-2

Кодовая буква	Тип	Примеры
A	Система, блок, группа компонентов	ЭБУ ABS, акустическая система, автомобильный телефон, противоугонная система, устройство управления, ЭБУ, круиз-контроль
B	Преобразователь неэлектрических сигналов в электрические и наоборот	Передатчик реперной метки, реле давления, звуковой сигнал, сирена, λ-датчик кислорода, динамик, датчик воздушного потока, микрофон, датчик давления масла, датчики всех типов, триггер зажигания
C	Конденсатор	Конденсаторы всех типов
D	Двоичный элемент, память	Бортовой компьютер, цифровое оборудование, интегральная схема, счетчик импульсов, магнитофон
F	Различные устройства и оборудование	Отопитель, кондиционер, лампы, фары, свечи зажигания, распределитель зажигания
F	Защитное устройство	Триггер (биметаллический), устройство для защиты от нарушения полярности, предохранитель, цепь защиты от тока
G	Питание, генератор	Аккумуляторная батарея, генератор, зарядное устройство
H	Контрольное устройство, сигнальный блок, сигнальное устройство	Акустический сигнальный блок, индикатор функции, индикатор указателя поворота, лампа указателя поворота, индикатор износа тормозных колодок, стоп-сигнал, индикатор дальнего света, индикатор заряда от генератора, индикаторная лампа, сигнальный блок, индикатор давления масла, оптический сигнальный блок, сигнальная лампа, зуммер
K	Реле, контактор	Реле аккумуляторной батареи, прерыватель указателей поворотов, реле указателей поворотов, тяговое реле, пусковое реле, прерыватель аварийной сигнализации
L	Индуктивность	Катушка индуктивности, катушка, обмотка
M	Тип двигателя	Двигатель вентилятора, двигатель насоса для гидравлических модуляторов ABS, TCS и ESP, двигатели омывателя и очистителя ветрового стекла, двигатель стартера, серводвигатель
H	Регулятор, усилитель	Регулятор (электронный или электромеханический), стабилизатор напряжения

Таблица 6. Кодовые буквы для обозначения электрических устройств (продолжение)

Кодовая буква	Тип	Примеры
F	Тестер	Амперметр, диагностическое гнездо, счетчик оборотов, индикация давления, тахограф, точка измерения, контрольная точка, спидометр
R	Сопротивление	Свеча предпускового подогрева с закрытым нагревателем, свеча предпускового подогрева с открытым нагревателем, нагревательный резистор, резистор с отрицательным температурным коэффициентом, резистор с положительным температурным коэффициентом, потенциометр, регулирующий резистор, последовательный резистор
S	Выключатель	Выключатели и кнопки всех типов, выключатель зажигания
T	Трансформатор	Катушка зажигания, трансформатор зажигания
U	Модулятор, преобразователь	Преобразователь постоянного тока
V	Полупроводник, трубка	Пара Дарлингтона, диод, электронная трубка, выпрямитель, полупроводники всех типов, диод регулируемой емкости, транзистор, тиристор, стабилитрон
W	Путь передачи, линия, антенна	Автомобильная антенна, экранированный провод, провода всех типов, пучок проводов, провод заземления
X	Вывод, штекер, штекерное соединение	Контактный вывод, электрические контакты всех типов, разъем свечи зажигания, контакт, клеммная колодка, соединитель проводов, штекер, гнездо, штекерный разъем, (множественное) штекерное соединение, распределитель
Y	Электрически активируемое механическое оборудование	Постоянный магнит, (электромагнитная) топливная форсунка, электромагнитное сцепление, электромагнитный тормоз, электрический топливный насос, электромагнит, электрический пусковой клапан, управление трансмиссией, линейный электромагнитный клапан, электромагнитный клапан включения пониженной передачи, регулятор фар, клапан регулировки уровня, переключающий клапан, пусковой клапан, запирание дверей, центральный замок
Z	Электрический фильтр	Фильтрующий блок, фильтр подавления помех, фильтрующая цепь, таймер

Обозначения выводов

Цель применения выводов в автомобильных системах электрооборудования, перечисленных в DIN 72552, – обеспечение простого и правильного подсоединения проводников к различным устройствам во время ремонта или замены оборудования. Обозначения выводов (табл. 7) не идентифицируют провода, так как с двух концов каждого провода могут быть подключены устройства с разными обозначениями выводов. По этой причине их не нужно наносить на провода.

Дополнительно могут использоваться обозначения выводов, соответствующие стандартам DIN-VDE для электрического оборудования. Множественные соединители, для которых уже недостаточно количества обозначений выводов по DIN 72552, нумеруются порядковыми номерами или буквами, для которых стандарты не регламентируют распределения функций.

Таблица 7. Обозначения выводов по DIN 72552

Вывод	Определение
	Катушка зажигания
1	Низкое напряжение
4	Высокое напряжение
4a	От катушки зажигания I, контакт 4
4b	От катушки зажигания II, контакт 4
15	Включ. плюс после аккумуляторной батареи (выход выключателя зажигания)
15a	Выход на последовательном резисторе к катушке зажигания и стартеру
	Выключатель предпускового подогрева и стартера
17	Пуск
19	Предпусковой подогрев
	Аккумуляторная батарея
30	Провод от плюсовой клеммы аккумуляторной батареи (прямой)
30a	Переключение аккумуляторной батареи 12/24 В Провод от плюсовой клеммы аккумуляторной батареи II
31	Возвратный провод от аккумуляторной батареи Минус или масса (прямой)
31 b	Возвратный провод к аккумуляторной батарее Минус или масса через выключатель или реле (включ. минус)
	Реле переключения аккумуляторной батареи 12/24 В
31a	Возвратный провод к минусу аккумуляторной батареи II
31c	Возвратный провод к минусу аккумуляторной батареи I
	Электродвигатели
32	Возвратный провод [1]
33	Главный выход [1]
33a	Автовозврат в исходное положение
33b	Поле параллельной обмотки
33f	для второго режима с пониженными оборотами
33g	для третьего режима с пониженными оборотами
33h	для четвертого режима с пониженными оборотами
33L	Вращение влево (против часовой стрелки)
33R	Вращение вправо (по часовой стрелке)

Вывод	Определение
	Стартер
45	Отдельное реле электродвигателя стартера, выход, стартер, вход (первичный ток)
	Двойные стартеры, параллельная активация
	Пусковое реле для тока ввода шестерен в зацепление
45a	Выход стартера I, Вход стартеров I и II
45b	Выход стартера II
48	Вывод на стартере для запуска (контролирующее процесс запуска)
	Прерыватель указателей поворотов (генератор импульсов
49	Вход
49a	Выход
49b	Выход на второй прерывающий контур
49c	Выход на третий прерывающий контур
	Стартер
50	Управление стартером (прямое)
	Реле переключения аккумуляторной батареи
50a	Выход для управления стартером
	Управление стартером
50b	Параллельная работа двух пусковых электродвигателей с управлением очерёдностью
	Пусковое реле управления очередностью сцепляющего тока в параллельной работе двух пусковых электродвигателей
50c	Ввод в пусковом реле для стартера I
50d	Ввод в пусковом реле для стартера II
	Реле блокировки запуска
50e	Вход
50F	Выход
	Реле повтора запуска
50g	Вход
50h	Выход

[1] Возможна обратная полярность, вывод 32/33

Таблица 7. Обозначения выводов по DIN 72552 (продолжение)

Вывод	Определение
	Двигатели для стеклоочистителей
53	Двигатель стеклоочистителя, вход (+)
53a	Стеклоочиститель (+), автовозврат в исходное положение
53b	Стеклоочиститель (шунтовая обмотка)
53c	Электрический насос омывателя ветрового стекла
53e	Стеклоочиститель (тормозная обмотка)
53i	Двигатель стеклоочистителя с постоянным магнитом и третьей щеткой для повышения оборотов
	Осветительная техника
55	Противотуманные фары
56	Фары
56a	Дальний свет с индикаторной лампой
56b	Ближний свет
56d	Контакт прерывателя фар
57a	Стояночный свет
57L	Левая лампа стояночного света
57R	Правая лампа стояночного света
58	Боковые габаритные, задние огни, подсветка номерного знака и приборов
58L	слева
58R	справа
	Генераторы и регуляторы напряжения
61	Индикатор зарядки
B+	Плюсовая клемма аккумуляторной батареи
B–	Минусовая клемма аккумуляторной батареи
D+	Плюсовая клемма генератора
D–	Минусовая клемма генератора
DF	Обмотка возбуждения генератора
DF1	Обмотка возбуждения генератора 1
DF2	Обмотка возбуждения генератора 2
U, V, 3	фазы
W	
	Аудиосистемы
75	Радиоприемник, прикуриватель
76	Динамик
	Выключатели
	Размыкающий контакт / переключающий контакт
81	Вход
81a	1-й выход, сторона размыкающего контакта
81b	2-й выход, сторона размыкающего контакта
	Замыкающий контакт
82	Вход
82a	1-й выход
82b	2-й выход
82z	1-й вход
82y	2-й вход
	Многопозиционный выключатель
83	Вход
83a	Выход, положение 1
83b	Выход, положение 2
83L	Выход, положение слева
83R	Выход, положение справа

Контакт	Определение
	Реле тока
84	Вход, выход, контакт реле
84a	Выход, привод
84b	Выход, контакт реле
	Переключающее реле
85	Выход, привод (конец обмотки – минус или масса)
86	Вход, привод (начало обмотки)
86a	Начало обмотки / 1-я обмотка
86b	Ответвление обмотки / 2-я обмотка
	Вывод реле для размыкающего контакта и переключающего контакта:
87	Вход
87a	1-й выход (сторона размыкающего контакта)
87b	2-й выход
87c	3-й выход
87z	1-й вход
87y	2-й вход
87x	3-й вход
	Вывод реле для замыкающего контакта:
88	Вход
	Вывод реле для замыкающего контакта и переключающего контакта (сторона замыкающего контакта):
88a	1-й выход
88b	2-й выход
88c	3-й выход
	Вывод реле для замыкающего контакта:
88z	1-й вход
88y	2-й вход
88x	3-й вход
	Лампа указателя поворота (прерыватель указателя поворота)
C	1-я индикаторная лампа
C0	Главный вывод для цепей проверки отдельно от прерывателя
C2	2-я индикаторная лампа
C3	3-я индикаторная лампа (например, для работы с двумя прицепами)
L	Лампа указателя левого поворота
R	Лампа указателя правого поворота

Список литературы

[1] EN 60617: Graphical symbols for diagrams.
[2] EN 61346: Industrial systems, installations and equipment and industrial products – Structuring principles and reference designations – Part 1: Basic rules.
[3] EN 61346-2: Part 2: Classification of objects and codes for classes.
[4] DIN 72552: Terminal markings for motor vehicles.

Разработка автомобильного программного обеспечения

Мотивация

Цель разработки

Любая разработка имеет целью создание новой или улучшение существующей функции. Такие функции создают дополнительные плюсы и удобства для водителя, других пассажиров, механиков СТО, перевозчиков, обеспечивают соответствие требованиям законодательства, упрощают обслуживание или повышают эффективность проектирования и изготовления. Техническая реализация может быть механической, гидравлической, электрической или электронной. Часто комбинируют сразу несколько этих технологий, а ключевую роль в реализации многих автомобильных новшеств все чаще играет электроника. Благодаря использованию электрики, электроники и программного обеспечения – логического ядра систем – экономически эффективно реализуются «интеллектуальные» функции привода, шасси и остальной части автомобиля.

Управление и контроль практически всех функций в автомобилях всех классов сегодня осуществляет электроника. Технологический прогресс и развитие электроники позволяют реализовать многие новые, более мощные функции за счет использования программного обеспечения.

Требования к программному обеспечению в автомобиле

Требования к программному обеспечению в автомобиле сильно разнятся. Многие системы для управления двигателем и обеспечения безопасности движения должны гарантировать реакцию операций управления, чтобы не возникло отставание от физического процесса. Поэтому при управлении очень быстрыми физическими процессами, такими как управление двигателем или динамикой движения, вычисления должны выполняться очень быстро. Кроме того, очень высоки требования к надежности во многих областях. Это особенно относится к функциям обеспечения безопасности. Программное обеспечение и электроника контролируются сложными системами диагностики.

Программное обеспечение используется во многих вариантах автомобиля и даже модельных рядах. Поэтому оно должно легко адаптироваться к соответствующим системам. Для этого оно содержит параметры калибровки и программные карты. Их количество в автомобиле может достигать нескольких десятков тысяч. Эти регулируемые переменнные имеют множество взаимных зависимостей. К тому же постоянно увеличивается степень связи отдельных систем между собой. Все чаще одна функция распределяется между несколькими системами или ЭБУ.

Программное обеспечение в автомобиле большей частью разрабатывается под конкретные области применения и интегрируется в единую систему. Его еще называют встроенным программным обеспечением, «зашитым» в постоянное запоминающее устройство. Многие функции часто разрабатываются и дорабатываются в течение длительного времени во многих уголках мира. Поскольку запасные части должны оставаться в наличии даже после завершения производства конкретного автомобиля, электроника в автомобиле должна иметь относительно длительный срок службы – до 30 лет.

Из соображений экономии в ЭБУ зачастую содержатся микроконтроллеры с ограниченной вычислительной мощностью и ограниченным объемом памяти. Во многих случаях для этого требуются меры по оптимизации разработки программного обеспечения для сокращения количества необходимых аппаратных средств.

Характерные особенности программного обеспечения зависят от области применения. В то время как программное обеспечение для привода и трансмиссии имеет широкие рамки, в программном обеспечении для ходовой части акцент делается на характеристиках, проявляемых в реальном времени. В системах обеспечения безопасности комфорта акцент делается на эффективность, т.е. расход ресурсов, а в мультимедийных приложениях за короткое время требуется обрабатывать большие объемы данных.

Проблемы, возникающие в связи с этими требованиями, должны решаться в тесном сотрудничестве автопроизводителей и поставщиков.

Структура программного обеспечения в автомобилях

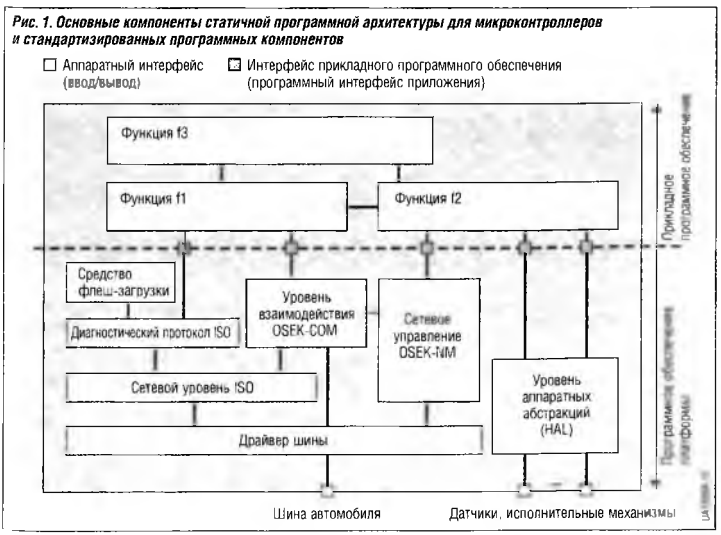
Программное обеспечение в автомобиле состоит из множества компонентов. Как и в случае с персональным компьютером, различают «воспринимаемые функции» программного обеспечения, прикладное программного обеспечения и платформенное программное обеспечение, частично зависящее от аппаратной части (рис. 1). Взаимодействие между всеми функциями определяется в архитектуре. Здесь могут быть различные отображения. Статичное отображение иерархически описывает функциональные группы, сигналы и распределение ресурсов. С другой стороны, функциональное отображение описывает прохождение сигнала через различные функции. Динамическое отображение, т.е. зависимое от времени, анализирует отклик при выполнении различных задач. Уже на раннем этапе введены стандарты для обеспечения взаимодействия между отдельными компонентами и их дальнейшего развития. Наиболее важные стандарты описаны ниже.

Важные стандарты для автомобильного программного обеспечения

Органы/комитеты

Ассоциация стандартизации автоматизированных и измерительных систем (ASAM) занимается стандартизацией в автомобильной промышленности применительно к моделям данных, интерфейсам и синтаксису [5]. ASAM разработала различные стандарты для подключения ЭБУ к компьютеру или терминалу ввода данных. Стандарт ASAM-MCD1 (MCD – измерение, калибровка и диагностика) поддерживает различные протоколы передачи данных. При использовании спецификаций ASAM-MCD2 можно обращаться к двоичным данным в ЭБУ и одновременно отображать соответствующие данные в виде физических значений и обрабатывать их. Стандарт ASAM-MCD3 также позволяет автоматизировать такие процессы, например, для автоматической калибровки данных. Есть и другие стандарты ASAM, регламентирующие, к примеру, обмен функциональными описаниями и данными.

Рис. 1. Основные компоненты статичной программной архитектуры для микроконтроллеров и стандартизированных программных компонентов



Консорциум FlexRay разработал спецификацию для полевой шины FlexRay для регулирования по разомкнутому и замкнутому (с обратной связью) циклу в автомобилях [6]. Благодаря высокой скорости передачи данных с запрограммированным арбитражем шины и отказоустойчивой конструкции она особенно подходит для использования в системах активной безопасности и в системе привода.

Международная электротехническая комиссия (IEC) устанавливает стандарты в области электротехники и электроники [9]. IEC предлагает три системы анализа, с помощью которых можно проверить соответствие международным стандартам. IEC работает в тесном взаимодействии с Международной организацией по стандартизации (ISO) [10], Международным телекоммуникационным союзом (ITU) и многочисленными органами стандартизации (в том числе Институтом инженеров-электриков и электронщиков, IEEE) [11].

Ассоциация разработчиков программного обеспечения для автомобилей (MISRA) – организация в автопромышленности, устанавливающая правила для разработки и внедрения надежного программного обеспечения в автомобильных системах [12]. Самым известным является стандарт программирования MISRA-C, разработанный компанией MISRA. Он предписывает правила надежного программирования на языке С. Цель этого стандарта – избежать ошибок периода исполнения из-за ненадежных конструкций языка С и возникновения слабых мест в структуре из-за непонимания между программистами, и защитить правильность выражений. Многие правила могут автоматически проверяться и учитываться при генерировании кодов.

Сообщество автомобильных инженеров (SAE) – международная научно-техническая организация, работающая в области технологий для обеспечения мобильности [13]. Помимо прочего, она устанавливает стандарты для автомобильной промышленности и способствует обмену знаниями и идеями.

Стандартизационный орган «Открытые системы и их интерфейсы для автомобильной электроники» (OSEK) появился из проекта немецкой автомобильной промышленности. Позже появилась инициатива «Vehicle Distributed Executive» (VDX) французской автомобильной промышленности. Стандартизация базовых компонентов программного обеспечения осуществляется под эгидой OSEK/VDX в следующих областях [14]:

- связь (обмен данными внутри и между ЭБУ);
- операционная система (выполнение в реальном времени программ ЭБУ и базовых услуг для других модулей OSEK/VDX);
- управление сетью (конфигурация и контроль).

Архитектура программных платформ для японской автомобильной промышленности (JasPar) [15] – инициатива для сокращения расходов и технологий разработки в автомобильной электронике. Она поощряет японские компании совместно разрабатывать технологии, не имеющие отношения к конкуренции, такие как сетевые решения, сервисные функции и базовое программное обеспечение. JasPar работает в тесном сотрудничестве с AUTOSAR и FlexRay.

AUTOSAR

AUTOSAR – это ассоциация автопроизводителей, изготовителей ЭБУ и средств для разработки, базового программного обеспечения для ЭБУ и микроконтроллеров. Цель AUTOSAR – упрощение обмена программного обеспечения на разных ЭБУ. Для этого была разработана стандартизированная программная архитектура со стандартизированными форматами описания и конфигурации для встроенного автомобильного программного обеспечения. AUTOSAR определяет методы описания программного обеспечения в автомобилях, обеспечивающие возможность повторного использования, обмена, масштабирования и интеграции компонентов программного обеспечения [16].

Главным для AUTOSAR является логическое распределение между базовым программным обеспечением (BSW) для конкретных ЭБУ и прикладным программным обеспечением, независимым от ЭБУ (ASW) и их соединение по виртуальной системе шин (VFB) (рис. 2). Эта виртуальная шина также соединяет компоненты программного обеспечения, реализованные в разных ЭБУ. Таким образом, их можно смещать между разными ЭБУ без необходимости вносить изменения в сами компоненты программного обеспечения. Это может быть полезно при оптимизации вычислительной мощности, требований к памяти и коммуникационной нагрузки.

Функциональные программные компоненты (SWC) строго разграничиваются между собой и с базовым программным обеспечением. Они, как правило, содержат конкрет-

ные алгоритмы управления, выполняемые во время прогона программы. Они сообщаются через интерфейс AUTOSAR с другими функциями и интерфейсами ЭБУ. Эти интерфейсы (API) определяются в описаниях SWC XML.

Среда прогона программы (RTE) обеспечивает связь между функциональными компонентами программного обеспечения и соответствующим базовым программным обеспечением на ЭБУ. RTE адаптируется к конкретному ЭБУ и области применения. Она может в большой степени создаваться автоматически из требований к интерфейсу.

Базовое программное обеспечение содержит программные части для конкретных ЭБУ – интерфейсы связи, диагностику и управление памятью. Базовое программное обеспечение также содержит слой сервисов. Это программное обеспечение сочетает в себе программные компоненты для общих сервисных функций (SRV), связи (COM) и операционной системы, частично зависящей от используемого ЭБУ (OS) [4, 14]. Последняя базируется на операционной система OSEK/VDX. В этой области ресурсы ЭБУ группируются и управляются таким образом, чтобы получить оптимальную сетевую поддержку, управление памятью, диагностику и пр. Используемые аппаратные средства заключаются в два слоя со взаимной зависимостью. Абстракция микропроцессора (MCAL) с прямым доступом к интерфейсным модулям ЭБУ продолжается в еще одном слое (абстракция ЭБУ). Драйверы сложных устройств (CDD) обеспечивают прямой доступ к ресурсам микроконтроллера для приложений с особыми требованиями к функциональности и выбору времени. Они также являются неотъемлемой частью базового программного обеспечения, т.е. прикладное программное обеспечение можно разрабатывать независимо от аппаратной части, даже когда требуются услуги драйверов сложных устройств.

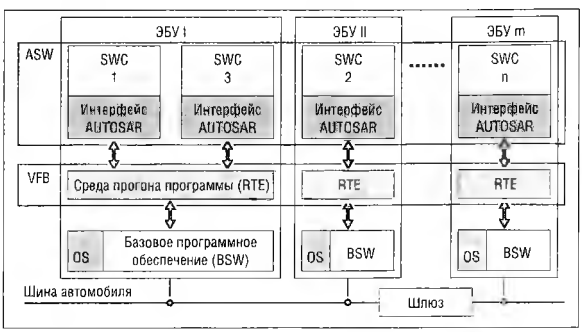
Помимо архитектуры ЭБУ, AUTOSAR частично стандартизирует также методы разработки. Это прежде всего относится к структуре и зависимостям различных рабочих продуктов (например, файлов). Они нужны для создания выполнимых программ для соответствующих ЭБУ из разных описаний программных компонентов.

Стандарты диагностики

Системы диагностики для проектирования и производства, ремонта и обслуживания автомобилей показали себя как очень затратные и негибкие. Они привязывают изготовителей к поставщикам и предотвращают простой обмен данными в случае взаимодействия между компаниями. Поэтому был разработан ряд диагностических стандартов (например, [17] и [18]).

Рабочая группа Automotive Electronics (ASAM-AE) [5] разработала три специфика-

Рис. 2. Архитектура AUTOSAR:
ASW – прикладное программное обеспечение; SWC – программный компонент, VFB – виртуальная функциональная шина; RTE– среда прогона; BSW – базовое программное обеспечение; OS – операционная система



ции для программных средств диагностики автомобилей, публикуемых в виде международных стандартов в группе стандартов ISO 22900 [19]:

- интерфейс между средой прогона и устройствами связи (MCD-1D и PDU-API, ISO 22900);
- стандарт ODX для обмена данными диагностики, например для передачи данных на тестер СТО (MCD-2D, ISO 22901);
- интерфейс объектно-ориентированного программирования (MCD-3D, ISO 22900) для диагностических приложений, таких как, например, диагностика с подсказками.

Стандарт MCD-1D учитывает существующие стандартные инструменты, например, устройства для программирования ЭБУ.

В настоящее время в рамках проекта стандарта ISO разрабатываются требования к формату обмена, «Коммуникационный формат последовательной проверки на отсутствие разрывов» (OTX), для создания, использования и обмена диагностическими программами.

Процесс разработки

Краеугольным камнем разработки программного обеспечения является изображение логической системной архитектуры в конкретной системе со всеми программами и данными. Здесь рассматривается вся система автомобиля, управляемая процессором. Особая важность придается четкому разделению составления технического задания, проектирования и реализации. Техническое задание с определением функций программного обеспечения составляется на физическом уровне, а проектирование и реализация программ и данных привязываются к конкретному микроконтроллеру.

Для удовлетворения приведенных выше требований в разработке программного обеспечения для автомобилей неотъемлемой частью разработки, в дополнение к технологии и инструментам, являются определяемые последовательности (процессы).

Модели для описания процессов

Для описания процессов при разработке программного обеспечения используется множество более или менее сложных моделей. Они обеспечивают прозрачность процессов, их сравнение, выявляют проблемные области и служат для проверки соответствия определенным стандартам. Однако они изначально не задумывались для непосредственного повышения качества самого программного обеспечения, эффективности или устранения систематических сбоев в процессах. Поэтому модели для описания процессов являются подходящими лишь частично. Ниже приводится описание на примере распространенной V-модели.

Принцип V-модели

Описанное здесь V-образное отображение процесса разработки используется во многих вариациях и степенях детализации. V-модель Федерации проектирования и реализации в сфере информационных технологий правительства Германии [20] здесь описана не будет.

V-модель распределяет этапы процесса, связанные непосредственно с разработкой, по лучам воображаемой буквы V, где по оси x отображается ход разработки, а по оси y – степень детализации соответствующего этапа (рис. 3). Этап процесса можно описать необходимыми вводными переменными, процедурой, методами, ролями, инструмен-

тами, критериями качества и выходными переменными. Этапы процесса, определяемые на левом луче латинской V, проверяются на ее правом луче. Эти этапы могут также проходиться несколько раз или быть поделены на части.

В расширенной V-модели можно рассмотреть сопутствующие процессы – например, запрос, изменение, управление проектом и качеством.

Модели для оценки процессов

Модели для оценки процессов, в дополнение к чистому описанию задач и процессов, предоставляют информацию о зрелости и качестве процессов. Таким образом, можно сравнивать, оценивать и утверждать этапы работы. Они также позволяют определить узкие места процессов, влияющие, к примеру, на качество продукта или затраты. Однако информация о качестве процессов не дает полной картины качества самих продуктов. Здесь описываются три самые важные модели оценки процессов.

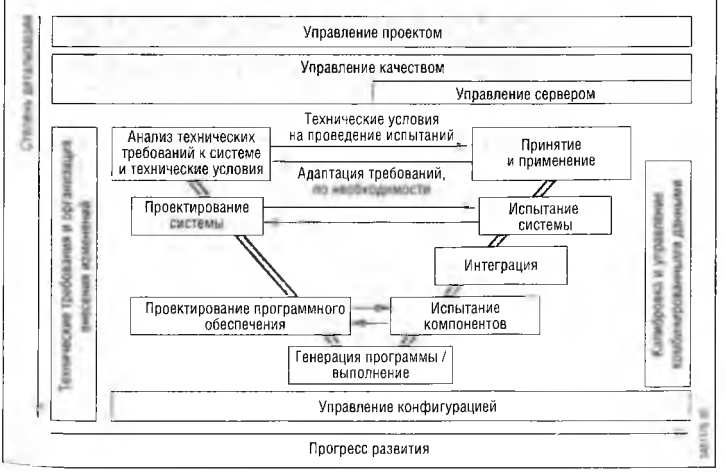
ISO 9000 и TS 16949

Ориентированный на процессы стандарт EN ISO 9000 регламентирует требования к системе управления качеством. Акцент здесь делается на взаимодействия и интерфейсы. Изначально акцент делался на производство и интерфейсы заказчика.

Техническая спецификация ISO/TS 16949 была разработана североамериканской и европейской автомобильной промышленностью устанавливает требования к системам управления качеством. Цель этого стандарта – эффективное повышение качества системы и процессов для повышения степени удовлетворенности клиентов, выявления сбоев и рисков в производственном процессе и каналах сбыта, устранения их причин и проверки эффективности коррекционных и профилактических мер. Сутью спецификации является не выявление, а скорее предотвращение сбоев.

Соответствие ISO 9000 и TS 16949 можно проверить путем сертификации.

Рис. 3. Расширенная V-модель



CMMI

CMMI – это модель для оценки и систематической оптимизации организации-разработчиков и их процессов [21], изначально разработанная Институтом разработки программного обеспечения (SEI). Она описывает набор требований к процессам и их зависимости (рис. 4). CMMI обеспечивает рамки, реализация которых требует ориентированной на бизнес интерпретации и организации содержания. Она описывает то, что необходимо сделать. Организация должна соответствующим образом описать, «как» это необходимо сделать. Содержание модели CMMI базируется на передовых методах организации работы, т.н. «лучших методах». CMMI обеспечивает процедуру для оптимизации процессов на долгосрочную перспективу от пути развития организации до обучения организации.

CMMI имеет много общего в плане содержания с ISO 9000/TS 16949. В этом контексте CMMI имеет большую степень детализации, в то время как ISO 9000/TS 16949 охватывает более широкий спектр областей применения.

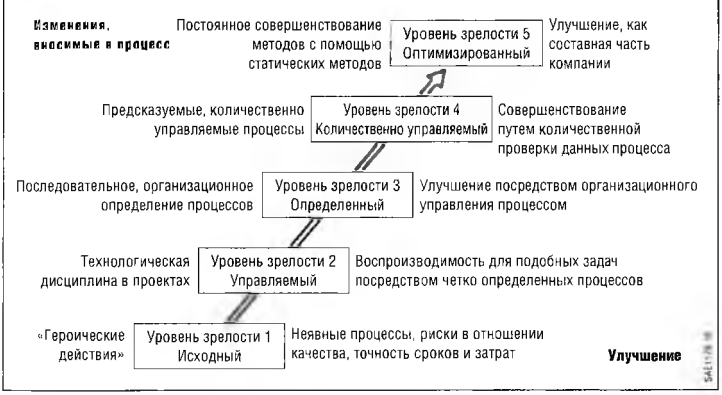
CMMI различает пять уровней зрелости (ML) подразделения организации (рис. 4, 5). Рассматриваются различные области процесса, в зависимости от уровня зрелости. Уровень зрелости считается достигнутым, когда все соответствующие области процесса отлажены и проверены системой оценки. Для

Рис. 4. Обзор процесса CMMI
ML – уровень зрелости

Категории	Области процесса
Управление процессом	ML3 Фокус организационного процесса (OPF) ML3 Описание организационного процесса (OPD) ML3 Организационное обучение (OT) ML3 [illegible] организационного процесса (OPP) [illegible]
Управление проектом	ML2 Планирование проекта (PP) ML2 Мониторинг и управление проектом (PMC) ML2 Поставщик, договор, управление (SAM) ML3 Интегрированное планирование управления (IPM) ML3 Управление при допущении риска (RSKM) [illegible]
Проектирование	ML2 Управление требованиями (REQM) ML3 Развитие требований (RD) ML3 Техническое решение (TS) ML3 Интегрирование произведений (PI) ML3 Контроль(VER) ML3 Проверка достоверности(VAL)
Поддержка	ML2 Управление конфигурацией (CM) ML2 Процесс и продукт поддержки качества (PPQA) ML2 Управление и анализ (MA) ML3 Анализ [illegible] и разрешение (CAR) ML3 Анализ решений и разрешение (DAR)

Области процесса		
	Элементарное управление и поддержка процессов (ML2)	Процессы проектирования (ML3)
	Организация и дальнейшее управление процессами (ML3)	[illegible] (ML4 и ML5)

Рис. 5. Уровни зрелости CMMI



выхода на более высокий уровень зрелости нужно еще раз проверить области процесса нижнего уровня.

CMMI используется в качестве оптимизационно-оценочной модели для организаций-разработчиков и обеспечивает хорошую поддержку при оптимизации процессов во всех подразделениях организации и оценке поставщиков.

Automotive SPICE

Аббревиатура SPICE расшифровывается как «совершенствование процессов в разработке программного обеспечения и определение возможностей». Automotive SPICE – это «автомобильный» вариант международного стандарта ISO/IEC 15504 (Процессы при разработке программного обеспечения) [22]. Это модель для оценки, с учетом специфики проекта, процессов, имеющих место при разработке программного обеспечения. Она, как и CMMI, концентрируется на требованиях к систематической разработке. Поэтому содержание моделей Automotive SPICE и CMMI очень похоже. Automotive SPICE больше концентрируется на требованиях к уровню и дает меньше возможностей для ориентированной на бизнес интерпретации требований. Automotive SPICE фокусируется (в настоящее время) только на программном обеспечении и только на отдельных проектах. Напротив, области применения CMMI шире и охватывают любые работы и услуги в сфере разработки и руководство ими. Automotive SPICE используется автопроизводителями в качестве модели для оценки проектов и поставщиков в области разработки программного обеспечения.

Оценка процессов выполняется с помощью двухразмерной модели. Понятие «размер процесса» служит для определения и выбора анализируемых процессов, а «размер уровня зрелости» – для определения и оценки их соответствующей возможности. Размер уровня зрелости состоит из шести ступеней уровня зрелости – «не завершено», «выполнено», «проконтролировано», «установлено», «предсказуемо» и «оптимизация».

Контроль качества при разработке программного обеспечения

Как и в случае с любым техническим продуктом, при разработке программного обеспечения также используется множество инструментов для контроля качества. В отличие от механики и электрики, контроль качества играет менее значительную роль в создании программного обеспечения, поскольку оно относительно легко воспроизводится. Важными моментами здесь являются общая функциональность системы, стандарты качества, овладение сложностью и применение. Поскольку программное обеспечение в автомобиле также охватывает системы, имеющие отношение к безопасности – например, систему управления динамикой и системы повышения безопасности при движении (DAS), контроль качества играет важную роль. Кроме того, очень важное значение имеет экономическое представление качества программного обеспечения, особенно в сложных системах.

ISO 61508 и TS 26262

В настоящее время автомобильная промышленность разрабатывает стандарт ISO 26262 (Транспортные средства – функциональная безопасность) для проектирования имеющих отношение к безопасности электрических и электронных систем в автомобилях на базе стандарта IEC 61508 (Функциональная безопасность электрических / электронных / программируемых электронных систем, имеющих отношение к безопасности) . Он включает в себя требования и к продукту, и к процессу разработки, и охватывает концепцию, проектирование, разработку, реализацию, запуск, обслуживание, модификацию, выключение и демонтаж как самой системы, имеющей отношение к безопасности, так и систем, уменьшающих риск. Стандарт обозначает эти этапы в целом как «полный жизненный цикл безопасности». Продукты делятся на уровни интеграции безопасности SIL 1 – SIL 4 (ISO 61508) и автомобильные SIL, ASIL A – ASIL D (ISO 26262). SIL 1 и ASIL A являются самым низким, а SIL 4 и ASIL D самым высоким уровнем интеграции безопасности.

Процессы разработки программного обеспечения для автомобилей

Междисциплинарная кооперация в разработке (например, между разработкой привода и электроники), распределенная разработка (например, между поставщиком и автопроизводителем или разработка в разных местах) и длительные жизненные циклы элементов программного обеспечения требуют общего понимания задач в целом. Например, при проектировании автомобильных функций управления с обратной связью и без нее, также должен обеспечиваться общий обзор всех требований к надежности и безопасности, а также аспектов реализации программного обеспечения. Для этого во многих областях используется разработка программного обеспечения на базе моделей (рис. 6).

Разработка программного обеспечения на базе моделей

Различают две области разработки программного обеспечения на базе моделей. Логическая системная архитектура содержит и описывает виртуальную область моделей, в то время как техническая системная архитектура содержит реальные ЭБУ и автомобили. Логическая системная архитектура отображается серым цветом, а техническая системная архитектура – белым. Эта процедура описывается функциями управления с обратной связью и без обратной связи, но подходит также и для общей реализации функций – например, для контроля и диагностики.

Функциональная модель на базе графики рассматривает все компоненты системы и может использоваться в качестве основы для общего понимания. При разработке программного обеспечения использование методов разработки на базе моделей, с блок-схемами или машинами конечного состояния, все чаще заменяет текстовые спецификации программного обеспечения. Этот метод моделирования программных функций имеет и другие преимущества. Если модель спецификации описывается формально, т.е. однозначно, без вариантов интерпретации, как математическая функция, то спецификация может быть выполнена на компьютере в режиме имитации и быстро и реалистично протестирована в самом автомобиле посредством создания прототипа быстрого управления. Кроме того, намного проще могут быть вскрыты несоответствия.

Для реализации заданных функциональных моделей в качестве программных компонентов для ЭБУ можно использовать методы автоматизированного генерирования кода. Поэтому функциональные модели должны содержать дополнительную информацию о разработке программного обеспечения. Сюда могут относиться меры по оптимизации, зависящие от характеристик продукта, необходимых электронной системе. Автоматизированное генерирование кода также гарантирует последовательность качественных характеристик кода.

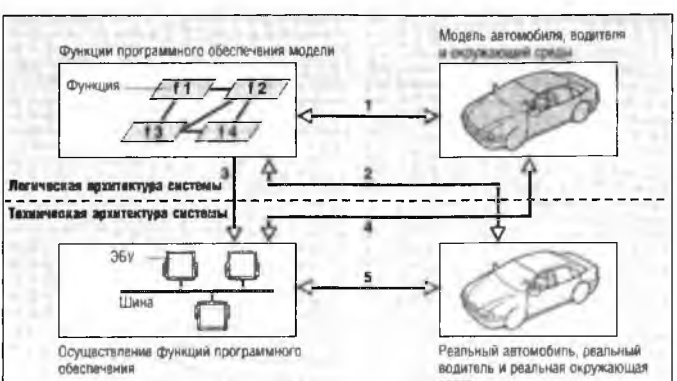
На следующем этапе виртуальные модели среды, при необходимости дополняемые реальными компонентами, такими как форсунки, имитируют среду ЭБУ, тем самым позволяя проводить циклические лабораторные испытания формата «In-the-Loop». По сравнению с испытаниями на стенде и на дороге они повышают гибкость и глубину испытаний, упрощая их воспроизводимость.

Калибровка функций программного обеспечения в электронной системе должна учитывать настройки, относящиеся к конкретному автомобилю – например, параметры, записанные в виде характеристических значений, кривых и карт этих функций. Во многих случаях это сопоставление происходит лишь на более поздней стадии разработки; зачастую прямо в автомобиле во время работы систем. Однако усиливается тенденция к более ранней (предварительной) передаче данных; т.е. уже на ранних этапах разработки как можно более реалистичные калибровочные данные определяются с помощью моделей или эмпирических значений. Из-за множества калибровочных переменных и взаимной зависимости для калибровки требуются подходящие процедуры и инструменты, потому что в конечном итоге качество калибровки, т.е. точная адаптация программного обеспечения к автомобилю, определяет степень использования потенциала программного обеспечения.

Функциональные сети и сети ЭБУ

Эта процедура может также применяться к разработке функциональных сетей и сетей ЭБУ. Однако в этих случаях появляются дополнительные аспекты, например:

Рис. 6. Этапы разработки программных функций на основе моделей:
этап 1: моделирование и имитация программных функций ЭБУ и автомобиля, водителя и среды на компьютере (все программные функции – это функциональные части программного обеспечения);
этап 2: создание прототипа быстрого управления программных функций в реальном автомобиле;
этап 3: реализация программных функций в реальном автомобиле,
этап 4. интеграция и тестирование ЭБУ в циклических испытательных системах, в лабораториях и на стендах;
этап 5: тестирование и калибровка программных функций автомобильных ЭБУ



- комбинации смоделированных, виртуальных компонентов и функций, уже реализованных в коде ЭБУ;
- комбинации смоделированных, виртуальных и реализованных механических компонентов и устройств.

Это полезно для различения функций на абстрактном уровне и технической реализации на более конкретном уровне. Концепция раздельного абстрактно-конкретного подхода применима ко всем компонентам автомобиля, к водителю и окружающей среде.

Моделирование и имитация программных функций

Моделирование

Для моделирования систем управления с обратной связью и без обратной связи следует по возможности использовать блок-схемы. В этих схемах для отображения отклика компонентов используются блоки, а для отображения потока сигналов между блоками – стрелки (рис. 7). Поскольку большинство систем многовариантны, то все сигналы обычно представлены в виде векторов. Они классифицируются на:

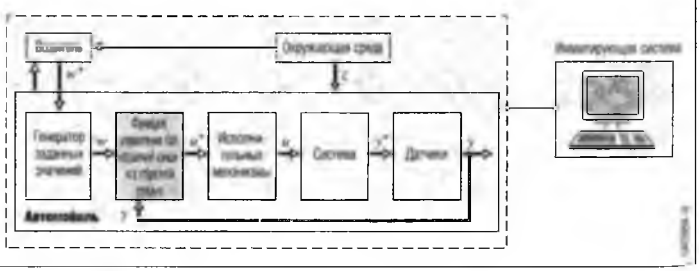
- измерительные переменные или переменные обратной связи y;
- выходные переменные с управлением без обратной связи или с обратной связью u^*;
- контрольные или заданные переменные w;
- значения, задаваемые водителем w^*;
- переменные с управлением без обратной связи или с обратной связью y^*;
- регулируемые переменные u;
- значения возмущений z.

Блоки классифицируются на:

- блоки с управлением без обратной связи или с обратной связью;
- модели исполнительных механизмов;
- системная модель;
- модели генераторов заданных значений и датчиков;
- модель водителя и окружающей среды.

Водитель может повлиять на функции контроллера без обратной связи или с обратной связью путем определения заданных значений. Все компоненты для ввода значений, задаваемых водителем (например, выключатели или педали), известны как генераторы заданных значений. В отличие от них, датчики регистрируют сигналы с завода. Модель этого типа может быть выполнена в имитационной системе (например, на персональном компьютере), что позволяет более детально проанализировать ее.

Рис. 7. Моделирование с блок-схемами и имитацией



Создание прототипа быстрого управления программными функциями

Создание прототипа быстрого управления в этом контексте включает в себя все методы для ранней реализации спецификаций для функций управления без обратной связи или с обратной связью в реальном автомобиле. Для этого в испытании должны быть реализованы смоделированные функции управления без обратной связи или с обратной связью. В качестве платформы для реализации программных частей функций управления без обратной связи или с обратной связью можно использовать экспериментальные системы (рис. 8).

Экспериментальные системы соединяются с генераторами заданных значений, датчиками и исполнительными органами, а также другими автомобильными ЭБУ, относящимися к общей системе. Интерфейсы с реальным автомобилем означают, что программные функции, реализованные в экспериментальной системе – и в ЭБУ – учитывают потребности в реальном времени.

В качестве ЭБУ в экспериментальных системах обычно используются компьютерные системы реального времени со значительно большей вычислительной способностью. Для решения этой задачи в качестве процессорного ядра все чаще используются персональные компьютеры. Это позволяет автоматически преобразовать модель программной функции из спецификации в реализуемую модель посредством создания прототипа быстрого управления, регламентируемого стандартизированными правилами. Затем заданное поведение можно моделировать с максимально возможной точностью.

Экспериментальные системы с модульной структурой можно конфигурировать под конкретную область применения – например, под необходимые интерфейсы для сигналов ввода-вывода. Вся система рассчитана на использование в автомобиле и управление от компьютера, например, персонального. Это позволяет тестировать спецификации программных функций на ранней стадии прямо в автомобиле. Затем спецификации могут, при необходимости, быть изменены.

При использовании экспериментальных систем различают приложения обхода и приложения с полной поддержкой.

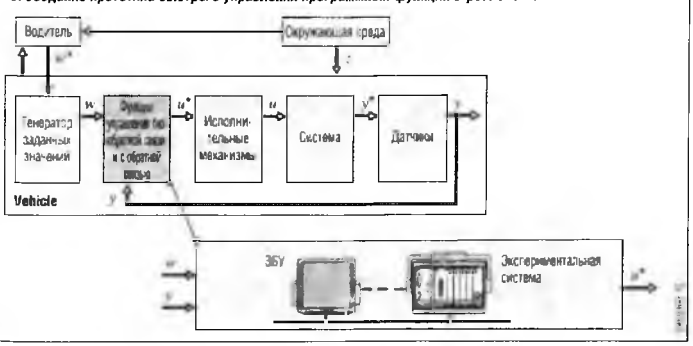
Процедура обхода

Приложения обхода в основном используются тогда, когда разрабатывается лишь несколько программных функций и имеется ЭБУ с хорошо зарекомендовавшей себя базовой функциональностью – например, из предыдущего проекта.

Приложения обхода также подойдут, если функции датчика и исполнительного механизма ЭБУ очень сложны, а их поддержка требует значительных усилий со стороны экспериментальной системы (например, в случае с ЭБУ двигателя).

Приложения с полной поддержкой больше подходят, если ЭБУ этого типа нет, если требуется протестировать дополнительные генераторы заданных значений, датчики и исполнительные механизмы и если функциональность ЭБУ достаточно сложная.

Рис. 8. Создание прототипа быстрого управления программных функций в реальном автомобиле



Можно также скомбинировать обход отдельных частей программного обеспечения с полной поддержкой всего программного обеспечения в целом, что повышает гибкость.

Приложения обхода

Приложения обхода подходят для раннего тестирования дополнительной или модифицированной программной функции автомобильного ЭБУ. Новая или модифицированная программная функция определяется моделью и работает в экспериментальной системе. Для этого требуется ЭБУ, способный выполнять базовые функции программного обеспечения, поддерживать все необходимые генераторы заданных значений, датчики и исполнительные органы и обеспечивать интерфейс обхода для экспериментальной системы. Новая или модифицированная программная функция разрабатывается с помощью создания прототипа быстрого управления. В этом случае она выполняется в экспериментальной системе (рис. 9).

Этот подход также приемлем для дальнейшего развития существующих функций ЭБУ. В этом случае существующие функции в ЭБУ продолжают использоваться, но модифицируются до такой степени, чтобы вводные значения отправлялись через интерфейс обхода, и использовались выходные значения из новой функции обхода. Необходимые программные изменения в ЭБУ называются ловушками обхода. Для синхронизации функциональных вычислений между ЭБУ и экспериментальной системой обычно используется процедура, когда ЭБУ инициирует вычисления функции обхода в экспериментальной системе через интерфейс управляющей логики. ЭБУ контролирует правдоподобие выходных значений функции обхода.

На функцию обхода можно также повлиять через автомобильную шину (например, CAN). Возможен даже доступ к центральному процессору ЭБУ через интерфейсы микроконтроллера посредством эмулятора.

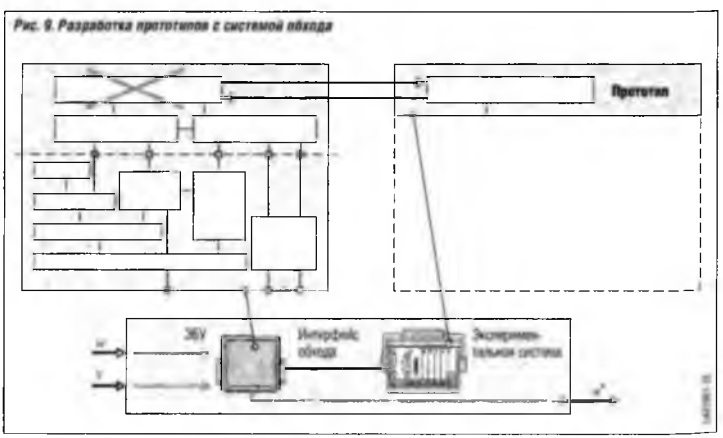
Приложение с полной поддержкой

Если в автомобиле должна тестироваться совершенно новая функция, а ЭБУ с интерфейсом обхода нет, то испытания можно провести с помощью приложения «с полной поддержкой». В этом случае экспериментальная система должна поддерживать все генераторы заданных значений, датчики и интерфейсы исполнительных органов для данной функции. Поведение функции в реальном времени также должно быть определено и гарантировано экспериментальной системой (рис. 10). Вообще, это делается операционной системой реального времени на компьютере с полной поддержкой.

Виртуальное создание прототипов

В случае со сложными системами лучше тестировать функции как можно раньше. Одну из возможностей дает виртуальное создание прототипов. Здесь прототип тестируется в виртуальной модели среды. Операционная система более нового ЭБУ (например, RTA)

Рис. 9. Разработка прототипов с системой обхода



работает в экспериментальной системе. Это позволяет считать временную характеристику более нового программного обеспечения хорошей.

Проектирование и реализация программных функций

На основании спецификации данных на стадии проектирования необходимо учесть функциональное поведение программной функции и ее поведение в реальном времени, все технические детали сети ЭБУ, реализованный микроконтроллер и архитектуру программного обеспечения. Тогда окончательная реализация программных функций может быть определена и осуществлена на базе программных компонентов (рис. 11).

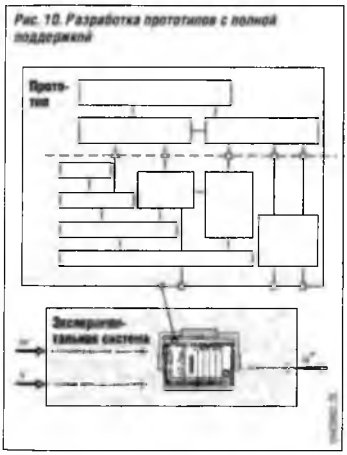
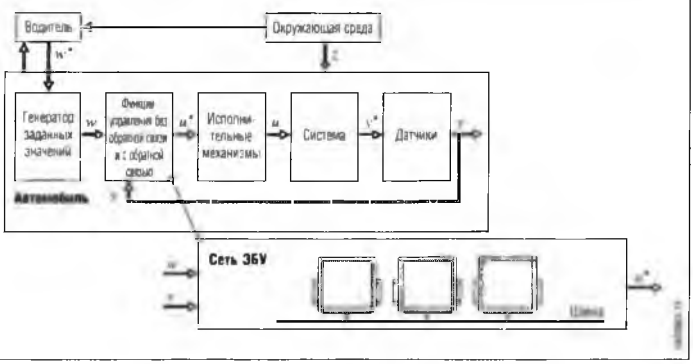


Рис. 10. Разработка прототипов с полной поддержкой

В дополнение к решениям по структуре и поведению программной функции, здесь учитываются временные и дискретные функции микроконтроллеров, реализация включает в себя решения по поведению в реальном времени, распределению и интеграции микроконтроллеров и ЭБУ и требованиям к надежности и безопасности электронных систем. Необходимо также учитывать все требования к электронным системам и автомобилям с точки зрения производства и обслуживания (например, концепции контроля и диагностики, параметризация программных функций, или обновления программного обеспечения для ЭБУ).

Создание кода и сопутствующих данных (данные для документации, управление вариантами или предварительная передача данных калибровки) часто выполняются автоматически в соответствии с установленными стандартами.

Рис. 11. Реализация функции управления с обратной связью и без обратной связи с помощью сети ЭБУ



Интеграция и тестирование программного обеспечения и ЭБУ

Требования

Прототипы автомобилей зачастую имеются в ограниченном количестве. Это означает, что у поставщика компонентов часто отсутствует полная или обновленная среда для интеграции и тестирования поставляемых компонентов. Ограничения среды тестирования могут иногда ограничивать возможные его этапы. По этой причине модели сред часто служат основой для испытательных систем и стендов на этапе интеграции и тестирования.

Интеграция компонентов – это точка сихронизации для разработок всех отдельных компонентов. Интеграционное, системное и приемочное тестирование не могут быть выполнены до тех пор, пока не будут доступны все компоненты. Для ЭБУ это означает, что программные функции могут тестироваться только при наличии всех компонентов в системе автомобиля (ЭБУ, генераторов заданных значений, датчиков, исполнительных механизмов и системы). Использование циклических систем тестирования формата In-the-Loop в лаборатории позволяет заранее проверять ЭБУ в виртуальной среде тестирования при отсутствии фактических периферийных компонентов (рис. 12).

Это позволяет проводить и автоматизировать испытания в воспроизводимых лабораторных условиях с высоким уровнем гибкости. В отличие от испытаний на стенде или в реальном автомобиле можно протестировать полный, неограниченный спектр рабочих состояний (например, ЭБУ двигателя можно протестировать при любой нагрузке и любых оборотах). Износ автомобиля и ситуации сбоев имитируются легко и позволяют протестировать функции контроля, диагностики и обеспечения безопасности. Допуски компонентов (например, в генераторах заданных значений, датчиках и исполнительных органах) можно имитировать таким образом, чтобы можно было проверять надежность функций управления с обратной связью и без обратной связи.

Значительным плюсом также является большая глубина тестирования, которой можно достичь путем автоматизации. Это позволяет, к примеру, протестировать максимально возможное количество типов сбоев и их комбинаций при точно воспроизводимых условиях и документировать их в журнале сбоев.

Эта процедура также применима к испытаниям имеющихся генераторов заданных значений, датчиков и исполнительных органов. Интерфейсы испытательной системы необходимо соответствующим образом изменить. В эту процедуру можно также встроить любые промежуточные этапы.

Рис. 12. Интеграция и тестирование ЭБУ с помощью циклической испытательной системы



На рис. 12 ЭБУ изображены в виде «черного ящика». Поведение функций ЭБУ можно оценить только на основе входных и выходных сигналов w, y и u^*. Этого изображения в виде «черного ящика» достаточно для простых программных функций. Однако для тестирования более сложных функций требуется интеграция процедуры измерения для внутренних промежуточных переменных ЭБУ. Эта технология измерения также называется инструментальным методом. Тестирование диагностических функций также требует доступа к запоминающему устройству неисправностей через диагностический интерфейс ЭБУ, а для этого требуется интеграция измерительно-диагностической системы.

Циклические испытательные системы

При циклических испытаниях встроенная электронная система подключается через интерфейсы к реальной (датчики, исполнительные органы) или виртуальной (математические модели) среде. Реакция системы анализируется и вводится обратно в систему. В зависимости от типа испытательных образцов различают следующие испытательные системы:

- В случае циклических испытаний модели (Model-in-the-Loop, MiL) тестируется функциональная модель программного обеспечения. Модель запускается на инструментальном компьютере систем автоматизированного проектирования.
- В случае циклических испытаний ПО (Software-in-the-Loop, SiL) тестируется программный код. Он запускается на инструментальном компьютере систем автоматизированного проектирования.
- В случае циклических испытаний функции (Function-in-the-Loop, FiL) тестируется программный код. Однако в отличие от SiL, он прогоняется на конечном устройстве. Связь между программным обеспечением и моделью среды выполняется посредством ловушек и эмулятора.
- В случае циклических испытаний аппаратной части (Hardware-in-the-Loop, HiL), весь ЭБУ проверяется посредством интерфейсов ввода-вывода. Также используются сочетания FiL и HiL. В качестве имитационных компьютеров все больше используются персональные компьютеры.

Циклические испытательные системы могут использоваться для проверки и дальнейшей разработки программного обеспечения и аппаратной части.

Рис. 13. Интеграция и тестирование ЭБУ в реальном автомобиле



Калибровка программных функций

Процедура

Любая электронно-управляемая автомобильная система может лишь тогда развить свою способность, когда она оптимально адаптирована к соответствующему типу автомобиля. Чтобы программные функции можно было использовать в как можно большем количестве вариантов автомобилей, они содержат регулируемые параметры. Адаптация этих параметров к соответствующему варианту автомобиля и к каждому режиму работы (например, холодный режим работы, экстремальная жара или высота) называется калибровкой. Для достижения нужного уровня функциональности в автомобиле в целом необходимо использовать множество характеристических значений, кривых и программных карт – калибровочных данных.

Большинство изменений в автомобиле требует изменений в калибровке. Пример: кислородный датчик (λ-зонд в системе выпуска измеряет остаточный кислород в выхлопе. На основе его сигналов можно определить фактически впрыскиваемое количество топлива. Таким образом, можно непрерывно и точно адаптировать параметры активации в ЭБУ двигателя. Необходимо адаптировать изменения в выпускной системе, приводящие к изменению противодавления отработавших газов в точке, где установлен λ-зонд (например, измененный выпускной коллектор, сажевый фильтр). Если этого не сделать, то результатом будет увеличение расхода и вредных выбросов.

Управление вариантами в разработке, производстве и обслуживании можно упростить путем разграничения программного статуса и статуса данных. Программный статус содержит, например, всю информацию о переменных, их предельных значениях и взаимосвязях, а статус данных содержит фактически примененные переменные.

Калибровка выполняется в лаборатории на стендах для двигателя и автомобиля во время испытаний автомобиля и в реальных условиях на испытательных маршрутах. В дополнение к измерительно-диагностической системе часто требуется калибровочная система для калибровки внутренних параметров ЭБУ (например, характеристических кривых и программных карт). По завершении калибровки производится комплексная проверка данных. Затем эти значения записываются в стираемую программируемую постоянную память (EPROM) или флэш-память последовательных ЭБУ.

Во время калибровки значения параметров должны быть регулируемыми. Поэтому система калибровки состоит из одного или более ЭБУ с подходящим интерфейсом измерительно-диагностической системы (рис. 14). В дополнение к использованию в автомобилях, измерительно-диагностические и калибровочные системы можно также использовать в циклических испытательных системах и на испытательных стендах.

Изменения значений параметров, например, значений характеристической кривой, поддерживаются в калибровочной системе редакторами. Они также могут работать на уровне реализации (т.е. с примененными значениями) или на уровне физической спецификации. Соответственно, измерительная система преобразует записанные значения в физическое представление или представление реализаций. На рис. 14 показан пример физического уровня и уровня реализации для характеристической кривой и записанного сигнала измерения.

При работе с системами калибровки обычно можно выбрать либо автономную калибровку, либо калибровку в реальном времени.

Автономная калибровка

При автономной калибровке выполнение функций управления с обратной связью и без обратной связи и функций контроля, т.е. «программы привода», прерываются для корректировки значений параметров. Поэтому при автономной калибровке возникает много ограничений. В частности, при использования на испытательных стендах и во время тестирования в автомобиле она всегда влечет за собой прерывание испытаний на стенде или на дороге.

Калибровка в реальном времени

При калибровке в реальном времени значения параметров можно регулировать во время выполнения программных функций микроконтроллерами. Поэтому можно регулировать значения параметров при выполнении функций управления с обратной связью и без обратной связи и функций контроля, и стало быть, во время обычного использования на испытательном стенде или в автомобиле.

Калибровка в реальном времени предъявляет высокие требования к стабильности функций управления с обратной связью и без обратной связи и функций контроля, поскольку ездовой цикл должен оставаться

стабильным во время всех процедур регулировки при возникновении исключений, например, если распределение точек интерполяции в характеристических кривых не сможет монотонно расти в течение коротких периодов времени. Калибровка в реальном времени подходит для долгосрочной модификации менее динамичных параметров (например, подстройки функций управления двигателем на моторном испытательном стенде).

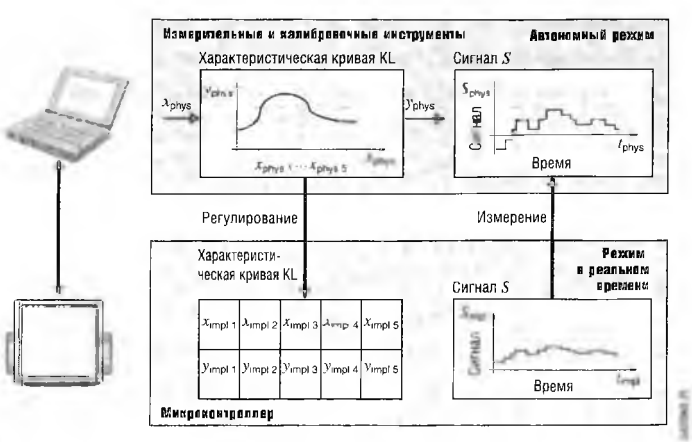
Для применения более динамичных функций или функций, имеющих критичное значение для обеспечения безопасности (например, настройки программных функций системы ABS для маневров торможения во время тест-драйва), настройки не выполняются во время фактических маневров торможения. В этом случае калибровка в реальном времени все равно может сэкономить время посредством предотвращения любых прерываний выполнения программы и, соответственно, снижения интервала между двумя тест-драйвами.

Перспективы

Новые автомобильные функции и технологии будут продолжать увеличивать объем программного обеспечения в автомобилях – даже в бюджетном сегменте. При этом во многих автомобилях количество ЭБУ остается неизменным. В результате объем функций некоторых ЭБУ продолжает расти. В целом системные разграничения между различными ЭБУ исчезают – например, в управлении гибридным приводом. Таким образом, электроника в автомобилях становится все более сложной. Поэтому ключевым элементом будущих разработок автомобильного программного обеспечения и сред разработки станет экономическая составляющая.

Другой тенденцией является все большая виртуализация разработок, когда отдельные части более поздних этапов разработки, таких как тестирование и калибровка, интегрируются в более простые фазы разработки, чтобы, к примеру, уже функциональные модели можно было циклически тестировать и снабжать данными на предварительной основе. Таким образом, сбои выявляются

Рис. 14. Принцип работы измерительно-калибровочных инструментов:
S – сигнал; t – время; x – вводная переменная; y – выходная переменная.
Сокращения: phys – физическое представление; impl – представление реализации



раньше, и непосредственно перед запуском серийного производства устраняются слабые места.

Список литературы

[1] Konrad Reif: Automobilelektronik – Eine Einfuhrung für Ingenieure, 3rd Edition, Vieweg-Verlag, 2009.
[2] Jorg Schauffeie, Thomas Zurawka: Automotive Software Engineering – Grundiagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge, 4th Edition, Vieweg-Verlag, 2010.
[3] Werner Zimmermann, Raif Schmidgall: Automobilelektronik – Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolie und Standards, 3rd Edition, Vieweg-Verlag, 2008.
[4] Robert Bosch GmbH: Autoelektrik/ Autoelektronik, 5th Edition, Vieweg-Verlag, 2007.
[5] Сайт ASAM: http://www.asam.de/
[6] Сайт FlexRay: http://www.flexray.com/
[7] Сайт LIN: http://www.lin-subbus.org/
[8] Сайт NEXUS 501, форум: http://www.nexus5001.org/
[9] Сайт IEC: http://www.iec.ch/
[10] Сайт ISO: http://www.iso.org/
[11] Сайт IEEE: http://www.ieee.org/portal/site
[12] Сайт MISRA: http://www.misra.org.uk/
[13] Сайт SAE: http://www.sae.org/
[14] Сайт портала OSEK VDX: http://www.osek-vdx.org/
[15] Сайт JasPar: http://www.jaspar.jp/english/
[16] Сайт AUTOSAR: http://www.autosar.org/
[17] ISO 14230: Road Vehicles – Diagnostic Systems – Keyword Protocol 2000, 1999.
[18] ISO 15765: Road Vehicles – Diagnostic Systems – Diagnostics on CAN, 2000.
[19] ISO 22900: Road vehicles – Modular vehicle communication interface (MVCI) – Hardware design requirements.
[20] V-model-f IABG: http://www.v-modell.iabg.de/
[21] Сайт CMMI: http://www.sei.cmu.edu/cmmi/
[22] Сайт Automotive SPICE: http://www.automotivespice.com/

Объединение автомобильных систем в сеть

Системы шин

В современных автомобилях широко используются сети для обмена данными, также называемые системами шин и протоколами. Различные компоненты, такие как датчики, исполнительные органы и компьютеры – «узлы» – соединяются между собой через единый канал (который может состоять из нескольких проводов) (рис. 1). По этому каналу передается множество данных. Например, скорость движения определяется в системе динамической стабилизации (ESP) и передается на все другие ЭБУ, подключенные к системе шин в виде узлов.

Преимущества систем шин

По сравнению с традиционными проводными соединениям, в которых отправитель и получатель информации соединены отдельными проводами, системы шин имеют значительные премущества:

- ниже стоимость материалов для проводов (что компенсирует более высокую стоимость электроники);
- меньше требуется пространства, меньше масса проводов;
- меньше штекерных соединений, подверженных сбоям, поэтому меньше возникает сбоев;
- данные можно распределять между различным получателями; например, сигналы датчика можно использовать в нескольких системах;
- доступ ко всем системам в автомобиле, соединяемым через шину, возможен из одной точки. Это упрощает диагностику и конфигурацию всех ЭБУ в конце линии (флэш-программирование);
- вычисления можно распределить между разными ЭБУ. Таким образом, в случае особенно большой потребности в вычислительной мощности того или иного ЭБУ, могут быть использованы возможности других ЭБУ или при отказе ЭБУ его функции могут быть распределены между другими ЭБУ;
- для обработки данных аналоговые сигналы датчиков должны быть преобразованы в цифровые. Сигналы датчиков могут преобразоваться прямо в датчике, затем информация рассылается по шине.

Требования к шинам

Общие требования

Для использования в автомобилях шины должны удовлетворять типичным требованиям. Шина должна использовать процесс передачи, управляющий временем распространения, затуханиями и отражениями сигналов для проводов длиной до 40 м, достающих до всех необходимых мест в автомобиле. Сеть должна быть способна соединить несколько десятков пользователей.

Шина должна выдерживать суровые условия эксплуатации в плане температуры, вибрации и электромагнитных помех.

Поскольку автомобили изготавливаются в больших количествах, то даже небольшая экономия для оборудования шинами одного автомобиля имеет большое значение. Также важно иметь несколько конкурирующих производителей оборудования шинами.

Существует большое количество вариантов оборудования, которое должно охватываться базовой конфигурацией шины. Доустановка

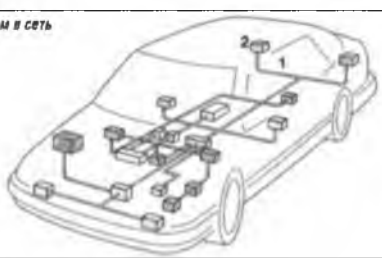


Рис. 1. Объединение автомобильных систем в сеть
Схематическое изображение узлов и каналов передачи данных
1 – канал передачи данных,
2 – узел (пользователь сети)

дополнительного оборудования не должна отражаться на других системах автомобиля.

Характеристики шины должны быть четко определены стандартом, с которым можно было бы сравнивать компоненты. Это гарантирует надежное взаимодействие проверенных компонентов разных поставщиков в единой сети.

Особые требования

К разным автомобильным системам предъявляются разные требования, и поэтому необходимо использовать разные шины. Скорость передачи данных очень сильно зависит от области применения. Она составляет несколько бит в секунду для включения освещения, несколько сотен килобит в секунду для системы управления двигателем и несколько мегабит в секунду для видео.

Для систем, в которых сбой или задержка выполнения функции критично с точки зрения безопасности (подушки безопасности, провода) должна обязательно гарантироваться определенная длительность передачи данных (задержка реакции). Когда время отклика шины определено и гарантировано, это называют детерминизмом. Таким образом, время передачи, в частности, сообщений известно уже на стадии проектирования.

Системы, имеющие отношение к безопасности, такие как электроусилитель руля, в течение всего срока службы, от проектирования до эксплуатации, должны демонстрировать соответствие используемых компонентов требованиям законодательства. Необходимо проверить, чтобы все было сделано по последним технологиям во избежание возникновения дефектов/сбоев в конструкции и обеспечения правильного функционирования при любых допустимых граничных условиях.

Неизбежно возникающие в процессе эксплуатации сбои передачи данных должны выявляться с надежностью, необходимой для соответствующей области применения.

Технические принципы

Компоненты шины

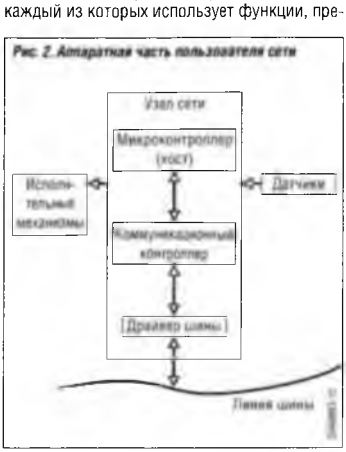
Чтобы сеть работала так, как это было запланировано, в каждой используемой сети должны постоянно выполняться вычисления. Они выполняются большей частью особым устройством (рис. 2), «коммуникационным контроллером». Он снимает нагрузку с фактического компьютера (хоста), который также может выполнять эту функцию, но менее эффективно. Коммуникационный контроллер может быть реализован в виде отдельного полупроводникового компонента; однако в случае, когда микроконтроллеров много, коммуникационные контроллеры у некоторых шин оказываются уже встроенными.

Еще один компонент, драйвер шины или трансивер, преобразует принимаемый от коммуникационного контроллера сигнал в физический сигнал на шине (например, уровень напряжения). Он преобразует получаемые на линии шины данные и отправляет их на коммуникационный контроллер.

Эталонная модель OSI

Международная организация по стандартизации (ISO) разработала эталонную модель OSI (модель взаимодействия открытых систем), часто используемую в качестве основы для описания и сравнения протоколов связи. В этой модели функция системы обмена данными делится на разные иерархические слои, каждый из которых использует функции, пре-

Рис. 2. Аппаратная часть пользователя сети



доставляемые другими слоями. Эталонная модель OSI помогает концептуально структурировать функцию коммуникационной системы. Однако для поиска эффективных решений не обязательно соблюдать эту модель.

Определяются семь слоев (рис. 3), но многие протоколы определяются только на одной их части. Верхние слои в эталонной модели OSI (слой приложения, слой представления и слой сеанса) большей частью не обслуживаются автомобильными шинами.

Физический слой

Физический слой определяет физические свойства передающей среды (например, уровень напряжения или форму штекеров). В автомобилях в основном используются электромагнитные сигналы в диапазоне от нескольких кГц до нескольких МГц с особыми проводами и оптоволокном. Радио на различных частотах и совместное использование проводов с уже подаваемым питанием – технологии, еще не испытанные на крупных партиях.

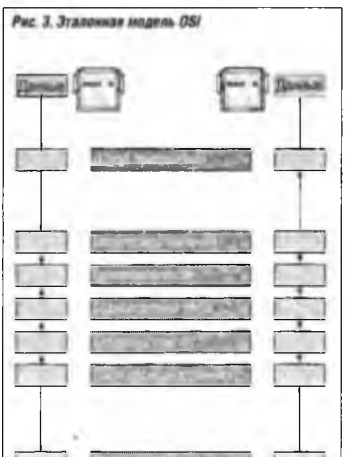
Наиболее широко распространенным методом, в силу небольших затрат, является передача по проводам, особенно по витой паре с разностью напряжений, с экранированием от излучения или без него, или по одножильным проводам с опорным напряжением на массу.

Там, где требуется высокая скорость передачи данных, прежде всего используются оптоволоконные линии из пластмассы или стекловолокна (для инфракрасной части спектра). Они нечувствительны к электромагнитному излучению (его источником может быть, например, система зажигания), но их прокладка стоит дорого и их стойкость к старению еще вызывает вопросы.

Физические возможности среды также ограничивают типы шифрования. В оптической среде существуют два состояния – «свет» и «нет света», и шифрование здесь амплитудное (яркость).

Высокочастотные сигналы напряжения, передаваемые по проводу дают разные возможности для представления битов. Самый простой и распространенный способ, используемый в автомобильных шинах – это шифрование, при котором каждому биту присваивается определенное значение напряжения (амплитудная модуляция), применяемое ко всей длительности бита (NRZ, без возврата на ноль). В этом частотном диапазоне концы проводов при необходимости должны быть подключены к нагрузочным резисторам для предотвращения отражения из-за нарушения формы сигнала.

Рис. 3. Эталонная модель OSI



Слой передачи данных

Слой передачи данных осуществляет обмен данными между соседними узлами. Биты данных группируются в пакеты (фреймы). Добавляя дополнительные биты, такие как контрольные суммы и числовые коды, можно выявлять и даже исправлять ошибки, возникающие при передаче. Ошибку можно также исправить путем запроса новой передачи.

Сетевой слой

Если не каждый пользователь сети напрямую соединен со всеми остальными, то необходимо найти маршрут для данных, проходящих через промежуточные станции. Эту задачу выполняет сетевой слой.

Транспортный слой

К функциям транспортного слоя относятся разборка крупных пакетов данных и их сборка у получателя, к которому отдельные части потенциально приходят по разным маршрутам в разное время или при возникновении ошибок передачи, обеспечивая повторную передачу пакета.

Методы доступа

Данные обычно передаются в виде пакетов с фиксированной структурой (фреймов), которые, наряду с фактическим содержанием, имеют метаданные об источнике, пункте назначения, приоритете и контрольные биты для защиты от повреждения.

Центральной функцией сети, к которой имеют доступ одновременно несколько пользователей, является распределение доступа, во избежание конфликтов. Применительно к шинам это называется арбитражем. Следует учитывать срочность отправки сообщения. Используются разные механизмы.

Управление временем

Циклически работающие шины (управление временем), обеспечивают бесконфликтный доступ, если для каждого узла статически определяется его доля в длительности цикла и обеспечивается синхронность тактов в узлах. Строгая периодичность гарантирует, что во всех режимах работы длительность пересылки сообщения будет известна. Это свойство требуется в таких системах, как электроусилитель рулевого управления, где слишком позднее выполнение действия недопустимо.

Кроме того, регулирование по времени стимулирует возможность независимой разработки нескольких подсистем, обеспечивающее предсказуемое поведение всей системы в целом. Когда каждая подсистема имеет свой независимый квант времени, два узла не могут помешать друг другу, одновременно занимая шину.

Ведущий-ведомый

Определенный узел (ведущий) предоставляет другим узлам (ведомым) ограниченный доступ (рис. 4). Таким образом, он определяет частоту связи путем опроса подчиненных узлов. Ведомый узел отвечает только тогда, когда он опрашивается ведущим узлом. Однако некоторые протоколы формата «ведущий-ведомый» для отправки сообщения разрешают ведомому узлу регистрацию на ведущем узле.

Многоабонентская шина

В многоабонентской шине различные узлы могут получать доступ к шине автоматически и отправлять сообщение, когда шина освобождается. Иными словами, каждый узел может выполнять роль ведущего, и все узлы могут инициировать отправку сообщения. Однако это также означает необходимость наличия методов определения доступа и разрешения конфликтов. Это можно сделать, например, на этапе принятия решений с назначением приоритетов или на этапе повторной отправки с задержкой. Использование управления приоритетами предотвращает конфликты на шине при попытке одновременного доступа к шине нескольких узлов. Узел сети, имеющий высокий приоритет или пытающийся передать высокоприоритетное сообщение, утверждается и первым отправляет свое сообщение. Когда линия снова освобождается, все узлы, пытающиеся отправить сообщения, особенно те, что находятся в ожидании, повторяют попытку отправки.

Многоабонентская структура оказывает положительный эффект на готовность системы, так как связью управляют не отдельные узлы, неисправности которых привели бы к полному сбою связи.

Передача маркера

Здесь право доступа временно предоставляется какому-либо узлу, который затем передает его на ограниченное время другому узлу.

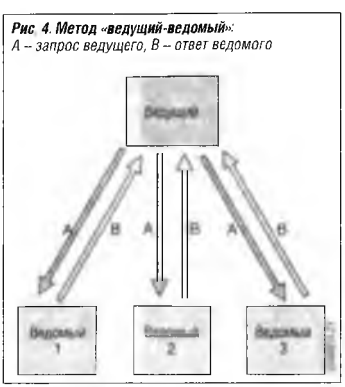


Рис. 4. Метод «ведущий-ведомый»:
A – запрос ведущего, B – ответ ведомого

Адресация

Чтобы сообщения передавались по сети, а их содержание можно было анализировать, они, помимо пользовательских данных (полезной нагрузки), содержат информацию о передаче данных. Она может быть явной либо неявной. Адресация требуется для того, чтобы сообщение доставлялось нужному получателю. Для этого существуют разные способы.

Ориентация на пользователя

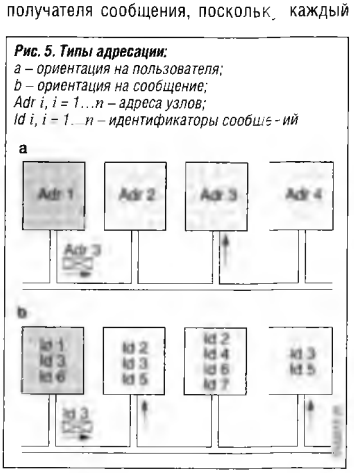
Здесь обмен данными осуществляется на основе адресов узлов (рис. 5, а). В передаваемом отправителем сообщении, помимо основных данных, содержится адрес пункта назначения. Все получатели сравнивают передаваемый адрес получателя с собственным, и лишь получатели с нужным адресом анализируют сообщение. Сообщения могут отправляться отдельным получателям, группам или всем узлам в сети.

Большинство систем связи (например, Ethernet) работают по принципу адресации, ориентированной на пользователя.

Ориентация на сообщение

Здесь адресуются не узлы–получатели, а сами сообщения (рис. 5, b). Сообщение идентифицируется по его содержанию идентификатором сообщений, заранее установленным для данного типа информации. При этом методе адресации отправителю не нужно знать получателя сообщения, поскольку каждый получатель сам решает, обрабатывать сообщение или нет. Сообщение может быть также принято и оценено несколькими узлами.

Рис. 5. Типы адресации:
a – ориентация на пользователя;
b – ориентация на сообщение;
Adr i, i = 1...n – адреса узлов;
Id i, i = 1...n – идентификаторы сообщений



Ориентация на передачу

Для идентификации сообщения можно использовать даже функции передачи. Если сообщение всегда отправляется в определенном промежутке времени, то его можно идентифицировать с помощью этого метода. В целях безопасности этот тип адресации во многих случаях также сочетается с адресацией, ориентированной на сообщение или пользователя.

Топология сети

Топология сети – это структура сетевых узлов и соединений. Она показывает, какие узлы соединены между собой, но не подробности (например, длину соединений). Для различных областей применения сетей связи к используемой топологии предъявляются различные требования.

Шинная топология

Эта топология также называется линейной шиной. Ключевым элементом является единый кабель, к которому подключаются все узлы через короткие соединительные кабели (рис. 6, а). В этой топологии очень легко расширить сеть дополнительными пользователями. Сообщения отправляются отдельными пользователями шины и распределяются по всей шине.

При отказе одного из узлов, ожидаемые от него данные не предоставляются другим узлам в сети, но остальные узлы могут продолжать обмениваться сообщениями. Однако сеть с шинной топологией полностью перестанет работать, если будут неисправен центральный кабель (например, в случае обрыва провода).

Звездная топология

Звездная топология состоит из центрального узла (повторителя, концентратора), к которому все остальные узлы подключаются через индивидуальные соединения (рис. 6, b). Поэтому сеть с такой топологией можно легко расширить, если в центральном элементе имеются свободные точки подключения.

Обмен данными осуществляется через индивидуальные соединения узлов с центральной звездой, при этом различают активные и пассивные звезды. Активная звезда содержит компьютер, обрабатывающий и

перенаправляющий данные. Эффективность сети в значительной мере определяется характеристиками этого компьютера. Однако центральный узел не обязательно должен иметь особые вычислительные средства для управления. Пассивная звезда лишь соединяет шинные линии пользователей сети.

При сбое у одного из пользователей или неисправности соединительного кабеля, идущего к центральному узлу, остальная сеть продолжает работать. Если же будет неисправен центральный узел, то не будет работать вся сеть.

Кольцевая топология

В кольцевой топологии каждый узел соединен с двумя соседними. В результате получается замкнутое кольцо (рис. 6, c). В кольце данные передаются только в одном направлении от одной станции к следующей. В каждом случае проверяется получение данных. Если они не предназначены для данной станции, то они обновляются (функция повторителя), усиливаются и отправляются на следующую станцию. Передаваемые данные направляются в кольцо, т.е. от одной станции к следующей, пока не дойдут до получателя или не вернутся в исходную точку. Когда сообщение пройдет через все кольцо, прием подтверждается всеми узлами. Когда происходит сбой какой-либо станции в кольце, передача данных прерывается, и вся сеть оказывается неработоспособной.

Кольца могут также иметь форму двойного кольца, в котором данные передаются в обоих направлениях. В этой топологии сбой одной станции или соединения между двумя станциями не является проблемой, поскольку все данные продолжают передаваться на все работающие станции в кольце.

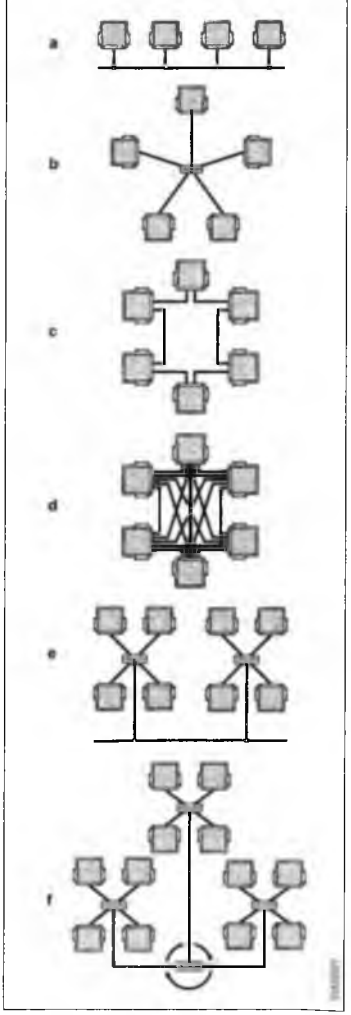
Топология типа «цепочка»

Топология типа «цепочка» выглядит как кольцевая, если убрать одно из соединений. Здесь первый компонент соединяется прямо с оборудованием, обрабатывающим данные (например, с компьютером). Последующие компоненты соединяются с предыдущими (принцип последовательного соединения), создавая цепочку. Таким образом, сообщения проходят через несколько узлов, пока не попадут к получателю.

Решетчатая топология

При решетчатой топологии каждый узел соединяется с одним или несколькими другими (рис. 6, d). При сбое одного узла или соединения

Рис. 6. Топологии сетей:
a – шинная топология; b – звездная топология; c – кольцевая топология; d – решетчатая топология; e – звездно-шинная топология, f – звездно-кольцевая топология



имеются каналы переадресации, по которым можно маршрутизировать данные. Поэтому сеть характеризуется большой устойчивостью к отказам. Однако стоимость организации сети и транспортировки сообщений высока.

Гибридные топологии

В гибридном варианте соединяются разные сетевые топологии. Возможны, к примеру, следующие комбинации:

- звездно-шинная топология: ядра различных звездообразных сетей соединяются между собой в виде линейной шины (рис. 6, e);
- звездно-кольцевая топология: ядра различных звездообразных сетей соединяются с главным ядром (рис. 6, f). в этом главном ядре ядра звездообразных сетей соединяются в форме кольца.

Надежность передачи

Важной особенностью шин, особенно если они используются в системах, имеющих отношение к обеспечению безопасности, является их способность выявлять сбои и, при необходимости, поддерживать работу в ограниченном режиме. Сюда относится возможность выявления повреждений данных. Электромагнитное излучение (например, от катушки зажигания) на провода может привести к тому, что некоторые биты в получателе примут некорректные значения. Эти случаи можно выявить путем передачи контрольной информации в дополнение к данным. Простейший случай – дополнительный бит четности, определяющий четность либо нечетность количества единиц. Общим случаем этого является «циклический контроль избыточным кодом» (CRC), с помощью которого можно получить разные уровни защиты через выбираемое количество контрольных битов.

Одним из способов обеспечения работы в ограниченном режиме является обход неисправных линий и предотвращение блокировки шины неисправными узлами.

Гарантируется, что элемент отправляемых узлом данных, например, скорость автомобиля, будет либо доступен всем адресатам в сети, либо ни одному (последовательность). Поэтому не может возникнуть ситуация, когда у двух узлов имеются разные отображения значения скорости. Для этой цели узел сигнализирует сбой приема или воздерживается от подтверждения корректного приема. Другие узлы отклоняют данные, уже корректно принятые ими.

Шины в автомобилях

Для быстрого обзора шины часто классифицируются согласно схеме, приведенной в табл. 1.

Таблица 1. Классификация шинных систем

Класс A	
Скорость передачи данных	Низкая (до 10 кбит/с)
Применение метода	Объединение в сеть исполнительных органов и датчиков
Реализация через	LIN, PSI5
Класс B	
Скорость передачи данных	Средняя (до 125 кбит/с)
Применение метода	Сложные механизмы обработки ошибок Объединение в сеть блоков управления в области обеспечения комфорта
Реализация через	Низкоскоростную шину CAN
Класс C	
Скорость передачи данных	Высокая (до 1 Мбит/с)
Применение метода	Требования к возможностям работы в реальном времени Объединение в сеть блоков управления в области управления приводом и шасси
Реализация через	Высокоскоростную шину CAN
Класс C+	
Скорость передачи данных	Очень высокая (до 10 Мбит/с)
Применение метода	Требования к возможностям работы в реальном времени Объединение в сеть блоков управления в области управления приводом и шасси
Реализация через	FlexRay
Класс D	
Скорость передачи данных	Очень высокая (> 10 Мбит/с)
Применение метода	Объединение в сеть блоков управления в области управления телематикой и мультимедийными системами
Реализация через	MOST

CAN

Обзор

Шина CAN (сеть контроллеров) была признана стандартом с момента своего появления в серийно выпускаемых автомобилях в 1991 году. Но она также часто используется в автоматизации. Основные особенности:

- передача сообщений с ранжированием приоритетов и неразрушающим арбитражом;
- снижение затрат благодаря использованию недорогой витой пары и простого протокола с невысокими требованиями к вычислительной мощности;
- скорость передачи данных до 1 Мбит/с у высокоскоростной шины CAN и до 125 кбит/с у низкоскоростной шины CAN (более низкие расходы на аппаратную часть);
- высокая надежность передачи данных за счет распознавания и сигнализации спорадических и постоянных неисправностей и благодаря унифицированию сетевых процессов через acknowledge;
- принцип многоабонентской шины;
- высокая степень готовности за счет обнаружения неисправных станций;
- стандартизация по ISO 11898 [1].

Система передачи

Логические состояния шин и шифрование

Для обмена данными шина CAN использует два состояния «доминантное» и «рецессивное», с помощью которых передаются информационные биты. Доминантное состояние соответствует «0», а рецессивное – «1». Для шифрования передачи используется процесс NRZ (без возврата на ноль), в котором нулевое состояние не всегда возвращается в промежуток между двумя одинаковыми состояниями передачи и, соответственно, необходимый для синхронизации временной интервал между двумя фронтами может оказаться слишком большим.

В основном используется двухпроводной кабель, в зависимости от окружающих условий, с витой или невитой парой. Две шинные линии называются CAN_H и CAN_L (рис. 1).

Двухпроводный кабель обеспечивает симметричную передачу данных, при которой биты передаются через обе шинные линии с использованием разных напряжений. Это уменьшает чувствительность к синфазным помехам, поскольку помехи влияют на обе линии и могут быть отфильтрованы путем создания разности (рис. 2).

Однопроводный кабель представляет собой способ сокращения производственных затрат за счет экономии на втором кабеле. Однако общее подключение к массе, выполняющей функцию второго кабеля, должно быть доступно для этой цели всем пользователям шины. Поэтому однопроводный вариант шины CAN возможен только для системы связи с ограниченным монтажным пространством. Передача данных по однопроводному кабелю более чувствительна к излучаемым помехам – он не позволяет фильтровать импульсы помех так, как в двухпроводном кабеле. В результате на шинной линии требуется сигнал более высокого уровня. Это, в свою очередь, отрицательно сказывается на излучении помех. Поэтому необходимо снизить крутизну фронта импульсов сигналов шины по сравнению с двухпроводным кабелем. Это связано с уменьшением скорости передачи данных. По этой причине однопроводной кабель используется только для низкоскоростной шины CAN в области кузова и электроники для функций комфорта. Например, низкоскоростная шина CAN с двухпроводным кабелем в случае обрыва кабеля должна продолжать работать как однопроводная система.

Однопроводное решение не описывается в спецификации CAN.

Уровни напряжения

Высокоскоростные и низкоскоростные шины CAN используют разные уровни напряжения для передачи доминантных и рецессивных состояний. Уровни напряжения низкоскоростной шины CAN показаны на рис. 1, a, а высокоскоростной – на рис. 1, b

Высокоскоростная шина CAN в рецессивном состоянии на обеих линиях использует номинальное напряжение 2,5 В. В доминантном состоянии на CAN_H и CAN_L подается номинальное напряжение 3,5 В и 1,5 В, соответственно. В низкоскоростной шине CAN в рецессивном состоянии на CAN_H подается напряжение 0 В (максимум 0,3 В), на CAN_L – 5 В (минимум 4,7 В). В доминантном состоянии на CAN_H напряжение составляет не менее 3,6 В, а на CAN_L не более 1,4 В.

Предельные значения

Для арбитражного метода в случае CAN важно, чтобы все узлы в сети видели биты идентификатора фрейма одновременно, чтобы узел, передавая бит, видел, передают ли их другие узлы. Задержки возникают из-за

Рис. 1. Уровень напряжения передачи данных по CAN:
a – низкоскоростная шина CAN (CAN-B), b – высокоскоростная шина CAN (CAN-C); CAN_H – высокий уровень CAN; CAN_L – низкий уровень CAN

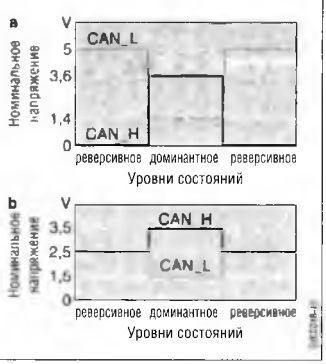
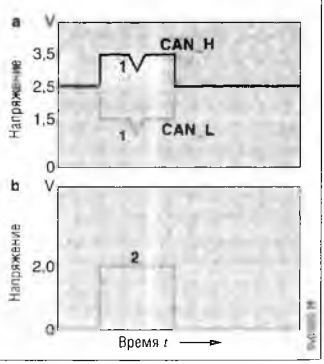


Рис. 2. Фильтрация помех на шине CAN:
a – уровень сигнала линий CAN с помехами на обоих линиях; b – разностный сигнал; 1 – паразитный импульс; 2 – разностный сигнал; CAN_H – высокий уровень CAN; CAN_L – низкий уровень CAN



распространения сигнала в шине данных и обработки в трансивере. Таким образом, максимально допустимая скорость передачи данных зависит от общей длины шины. Стандарт ISO предусматривает скорость 1 Мбит/с для 40 м. У более длинных проводов возможная скорость передачи данных примерно обратно пропорциональна длине провода. Сети с дальностью 1 км могут работать со скоростью 40 кбит/с.

Протокол CAN

Конфигурация шины

CAN работает в соответствии с принципом многорежимного управления, при котором линейная структура шины подсоединяет несколько блоков управления равного приоритета ранжирования.

Адресация по содержанию

CAN использует адресацию по содержанию сообщений. Каждому сообщению присваивается метка-идентификатор, который классифицирует содержание сообщения (например, о частоте вращения коленчатого вала двигателя). В каждой станции ведется обработка только тех сообщений, чьи идентификаторы накапливаются в приемочном списке сообщений. Это называется приемочной проверкой (рис. 3). Таким образом, CAN не требует адресов станции для передачи данных. Это облегчает адаптацию к различным уровням оборудования.

Логические состояния шины

Протокол CAN основывается на двух логических состояниях: биты информации являются или «рецессивными» (логическое состояние 1), или «доминантными» (логическое состояние 0). Когда, по крайней мере, одной из станций передается доминантный бит, тогда перезаписываются рецессивные биты, одновременно посылаемые ото всех других станций.

Назначение приоритетов

Идентификатор присваивает адреса данным как содержания, так и приоритета посылаемых сообщений. Идентификаторы, соответствующие низким бинарным числам, используют высокий приоритет и наоборот.

Арбитраж шины

Каждая станция может начать передачу сообщения только после освобождения шины. Когда несколько станций начинают передавать сообщения одновременно, для разрешения создаваемых конфликтов доступа к шине используется арбитраж «wired-and» (монтажное И). Сообщению с высшим приоритетом (наименьшим двоичным значением идентификатора) присваивается право первого доступа, без задержек и потерь битов (рис. 4). Передатчики реагируют на невозможность получения доступа к шине путем автоматического переключения в режим приема; затем ими повторяется попытка передачи, как только шина снова освобождается.

Рис. 3. Адресация и проверка приемки
Станция 2 отправляет, станции 1 и 4 принимают данные

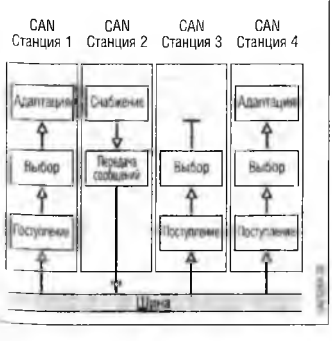
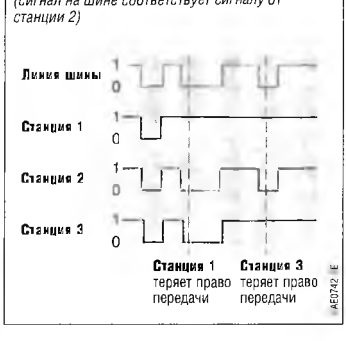


Рис. 4 Побитовый арбитраж:
0 – доминантный уровень; 1 – рецессивный уровень. Станция 2 получает первый доступ (сигнал на шине соответствует сигналу от станции 2)



Фрейм данных и формат сообщения

Шина CAN поддерживает два разных формата сообщений, различающихся только длиной идентификаторов. Стандартный формат включает 11 битов, в то время как расширенная версия состоит из 29 битов. Таким образом, рамка передачи данных содержит максимум 130 битов стандартного или 150 битов расширенного формата. Это обеспечивает минимальное время ожидания до последующей передачи, которая может быть срочной.

Фрейм данных состоит из семи последовательных полей (рис. 5). «Начало фрейма» показывает начало сообщения и синхронизирует все узлы.

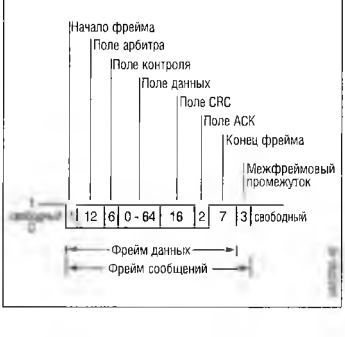
Поле «арбитра» состоит из идентификатора сообщения и дополнительного контрольного бита. Во время передачи этого поля передающее устройство сопровождает передачу каждого бита проверкой о том, что сообщение более высокого приоритета, которое могло бы аннулировать санкционированный доступ, не передается. Контрольный бит определяет, будет ли сообщение классифицироваться как «фрейм данных» или «дистанционный фрейм».

Поле «контроля» содержит код, показывающий количество байтов данных в поле «данных».

Поле «данных» содержит от 0 до 8 байтов. Сообщение длиной 0 данных может быть использовано для синхронизации распределительных процессов.

Поле «CRC» (периодический резервный контроль) содержит контрольную сумму для обнаружения возможных помех при передаче.

Рис. 5. Фрейм данных



Поле «ACK» (уведомление) содержит сигналы подтверждения, с помощью которых получатели подтверждают доставку сообщений.

«Конец фрейма» обозначает конец сообщения.

Затем идет «межфреймовый промежуток», отделяющий фрейм от следующего фрейма.

Инициация передатчика

Передатчик обычно инициирует передачу данных посредством отправки фрейма данных. Однако приемник также может запросить данные от передатчика, отправив дистанционный фрейм. Этот дистанционный фрейм имеет тот же идентификатор, что и соответствующий фрейм данных Они различаются битом, стоящим после идентификатора.

Обнаружение ошибок

Контролирующими отличительными признаками ошибок являются:

- 15-битовый CRC: (каждый приемник сравнивает получаемую им последовательность CRC с вычисляемой последовательностью);
- контроль: каждый передатчик считывает с шины собственное переданное сообщение и сравнивает каждый переданный и отсканированный бит;
- заполнение битами: (между началом фрейма и концом поля CRC каждого фрейма данных или дистанционного фрейма могут находиться максимум пять последовательных битов одной полярности); передатчик реализует пять последовательных битов одной полярности путем вставки в поток битов бита противоположной полярности. После доставки сообщений получатели снова удаляют эти биты;
- проверка фреймов: (протокол CAN содержит несколько битовых полей со смешанным форматом для проверки всех станций).

Обработка ошибок

При обнаружении ошибки контроллер CAN прерывает текущую передачу отправкой сигнала ошибки, состоящего из шести доминантных битов; при этом происходит сознательное нарушение условия наполнения битами и форматов.

Локализация неисправностей
Так как неисправные станции могут значительно ухудшать нагрузочный режим шины, бортовые контроллеры связи могут включать механизмы, которые позволяют различать промежуточную и постоянную ошибки из-за неисправности местной станции. Этот процесс базируется на статистической оценке условий возникновения ошибок.

Варианты исполнения
Изготовители полупроводников предлагают различные варианты исполнения контроллеров CAN, различающиеся в основном возможностями хранения и обработки сообщений. Таким образом, главный компьютер может быть освобожден от операций, связанных с протоколом.

Стандартизация
Шина CAN стандартизирована для обмена данными в автомобилях; для низкоскоростной передачи (до 125 кбит/с) - ISO 11898-3, для высокоскоростной передачи (более 125 кбит/с) - ISO 11898-2 и SAE J 1939 (грузовики и автобусы).

CAN с таймерным управлением
Расширенный протокол CAN с возможностью работы в режиме таймерного управления называется «CAN с таймерным управлением» (TTCAN). В нем можно произвольно выбрать соотношение компонентов с таймерным управлением и компонентов с управлением событиями, поэтому он полностью совместим с сетями CAN. TTCAN стандартизируется в ISO 11898-4.

FlexRay

Обзор
FlexRay – это шина, разработанная для автоматического управления в автомобилях. При ее разработке особое внимание уделялось пригодности для использования в системах активной безопасности без механического перехода на аварийный режим (X-by-Wire), где требуются детерминизм и отказоустойчивость. Благодаря высокой скорости – до 20 Мбит/с – при передаче данных с резервированием, данную шину также можно использовать для передачи аудиосигнала или видеосигнала с высокой степенью сжатия. Основные особенности:
- передача с таймерным управлением с гарантированной задержкой отклика;
- возможность передачи информации с управлением событиями с назначением приоритетов;
- передача информации по одному или двум каналам;
- высокая скорость передачи, до 10 Мбит/с, с параллельной передачей по двум каналам до 20 Мбит/с;
- структура в виде линейной шины, звездообразной конфигурации или в комбинированном виде.

Спецификацию можно найти на сайте консорциума FlexRay [3].

Среда передачи
Среда передачи, используемая в системе FlexRay, – это двухпроводной кабель с витой парой, где могут использоваться как экранированные, так и неэкранированные кабели. Каждый канал FlexRay состоит из двух ветвей, шина-плюс (ВР) и шина-минус (ВМ). Для шифрования FlexRay использует метод NRZ (без возврата на ноль)

Состояние шины определяется путем измерения разности напряжения между ВР и ВМ. Таким образом, передача данных менее чувствительна к внешним электромагнитным влияниям, поскольку они одинаково воздействуют на обе ветви и компенсируют друг друга.

При подаче разного напряжения на две ветви канала могут иметь место четыре состояния шины; они обозначаются как Idle_LP (LP, низкая мощность), Idle, Data_0, и Data_1 (рис. 6). Idle_LP – это состояние, при котором на ВР (шина-плюс) и ВМ (шина-минус) подается низкое напряжение от –200 до 200 мВ (относительно массы). В состоянии Idle на

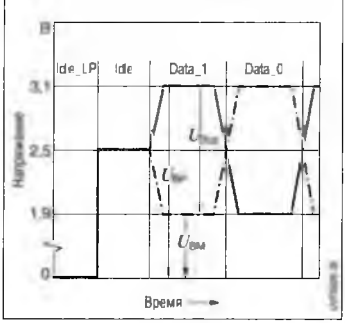
ВР и ВМ подается напряжение 2,5 В +-30 мВ. Чтобы перевести канал в состояние Data_0, как минимум один передающий узел должен подать на канал отрицательное напряжение –600 мВ, а для Data_1 +600 мВ.

Топологии

Сети FlexRay можно структурировать как шинные топологии и звездообразные топологии. Может быть и две звезды, если в звездах учитывать задержки сигналов. Также возможны топологии, в которых к звезде подключено несколько шин.

Поскольку оба канала системы FlexRay могут быть структурированы независимо друг от друга, в обоих каналах можно использовать разные топологии. Например, один канал может быть структурирован в виде активной звездообразной топологии, а другой – в виде шинной.

Рис. 6. Состояния и напряжения шины FlexRay



Из-за частот, которые могут превышать частоты CAN в десять раз, при проектировании сети FlexRay необходимо проследить во всех топологиях, чтобы такие параметры, как длина провода и нагрузочные резисторы, выбирались таким образом, чтобы искажения сигнала оставались в допустимом диапазоне.

Доступ к шине, управление временем

Для достижения детерминизма, т.е. гарантированной максимальной длительности передачи сообщения, связь в шине FlexRay выполняется с управлением по времени, с циклами постоянной длительности. Каждый цикл в первую очередь имеет статический сегмент, поделенный на одинаковые интервалы времени (рис. 7). За каждым промежутком времени постоянно закрепляется не более одного узла из тех, которым в данный момент разрешена передача.

За ним следует динамический сегмент, в котором доступ к шине определяется приоритетом сообщений. Промежуток между статическим и динамическим сегментами можно произвольно менять, но не во время работы. То же самое относится к длительности интервалов времени, которые можно регулировать, но они должны оставаться постоянными во время работы.

В качестве третьего элемента в цикле можно определить окно «символов». Его можно использовать для передачи одного символа. Символы предусмотрены для активации сети и проверки функциональности.

Рис. 7. Управление по времени, FlexRay:
A1 – узел A передает сообщение 1;
A2 – узел A передает сообщение 2;
MTS – символ проверки среды



Синхронизация

Каждому узлу в сети требуется свой генератор синхронизирующих импульсов, определяющий время для передачи и длительность битов. Внутренние генераторы синхронизирующих импульсов нескольких узлов могут отличаться друг от друга из-за колебаний температуры и напряжения и производственных допусков. Поэтому в шинной системе, такой как FlexRay, управляющей доступом к шине через промежутки времени, необходимо посредством регулярных коррекций обеспечить, чтобы отклонение синхронизирующих импульсов друг от друга оставалось в допустимом диапазоне. Для этого некоторые узлы берут на себя функции синхронизаторов, с которыми другие узлы регулярно синхронизируют свои внутренние синхронизирующие импульсы. Эта процедура адаптирует и нулевые точки (смещение) синхронизирующих импульсов, и их частоту. Работа может продолжаться даже при отказе отдельных узлов. Чтобы можно было делать коррекцию, каждый цикл завершается короткой фразой (NIT, перерыв в работе сети), в которой можно сдвигать нулевую точку цикла.

Благодаря этой процедуре во всех узлах обеспечивается «глобальное время»; это время выдается в виде макроимпульсов сигнала времени. Механизм синхронизации поддерживает длительность одного макроимпульса в среднем постоянной во всех узлах.

Когда сеть включена, сначала нужно установить общую концепцию времени со стороны всех узлов. Для этой цели служит процесс запуска, занимающий небольшое время. Аналогичным образом, узлу, намеревающемуся синхронизироваться с работающей сетью, требуется определенное время, чтобы быть принятым во внимание.

Арбитраж в динамическом сегменте

Сообщениям может даваться разный приоритет в динамическом сегменте. Длительность передачи сообщения не может гарантироваться. Приоритет устанавливается идентификатором фрейма, который может быть присвоен в сети лишь один раз. Сообщения передаются в порядке их идентификаторов фрейма. Для этого каждый узел запускает счетчик (идентификатор интервала), увеличивающийся при получении сообщения. Если идентификатор интервала принимает значение идентификатора фрейма готового сообщения в этом узле, то оно передается. Если длина динамического сегмента недостаточна для всех сообщений, то процесс передачи должен быть смещен на более поздний цикл.

Фреймы в динамическом сегменте могут иметь разную длину. Пределы динамического интервала на двух каналах не зависят друг от друга. Таким образом, могут быть сообщения с разными идентификаторами интервалов.

Фрейм данных

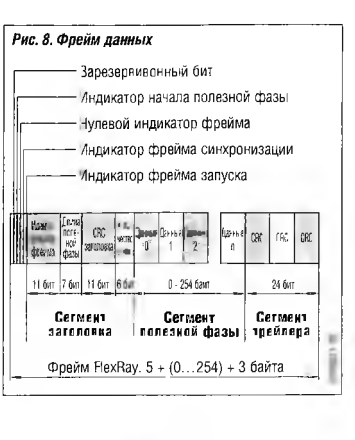
FlexRay и в динамическом, и в статическом сегментах использует одинаковый формат, который может быть поделен на три раздела – заголовок, полезная фаза и трейлер (рис. 8).

Заголовок

Заголовок включает в себя:

- зарезервированный бит для будущих изменений протокола;
- индикатор начала полезной фазы, указывающий, содержится ли в ней вектор управления сетью;
- нулевой индикатор фрейма, указывающий, что данные не обновлялись с последнего цикла;
- индикатор фрейма синхронизации, указывающий, что данный фрейм нужно использовать для синхронизации системы;
- индикатор фрейма запуска, указывающий, что данный фрейм используется в фазе запуска сети;
- идентификатор фрейма; соответствует номеру интервала, в котором передается фрейм.

Рис. 8. Фрейм данных



- Длительность полезной фазы с указанием размера пользовательских данных. У всех интервалов в статическом сегменте в этом поле всегда стоит одинаковое значение. Фреймы в динамическом сегменте могут иметь разную длину.
- CRC заголовка, придающий этой части фрейма дополнительную защиту, из-за его чувствительности к ошибкам в разряде.
- Количество циклов, в этом поле передается номер цикла, в котором размещается передающий сетевой узел.

Полезная фаза

Пользовательские данные, далее обрабатываемые главным компьютером, передаются в сегмент полезной фазы Можно также передать вектор управления сетью или 16-битовый идентификатор сообщения.

Максимальная длины пользовательских данных составляет 254 байта, они передаются 2-байтовыми словами

Трейлер

Трейлер содержит 24-битовую контрольную сумму (CRC фрейма), действующую на весь фрейм.

Генерирование потока битов фрейма

Прежде чем узел сможет передать фрейм с данными хоста, фрейм преобразуется в «поток битов». Для этого фрейм сначала разбивается на отдельные байты. В начало фрейма вставляется стартовая очередность передачи (TSS), затем стартовая очередность фрейма (FSS). Затем на основе байтов фрейма генерируется расширенная байтовая очередность, где перед каждым байтом фрейма вставляется стартовая байтовая очередность (BSS).

Для завершения потока байтов в конце добавляется завершающая очередность фрейма (FES).

В случае, когда фрейм находится в динамическом сегменте, можно добавить в поток битов еще одну очередность – динамическую конечную очередность (DTS), предотвращающую запуск передачи другим узлом.

Режимы работы

Шину FlexRay можно перевести в режим, когда узлам требуется лишь минимальная мощность, и все операции шифрования и дешифрования остановлены, но могут быть активированы сигналом на линии шины. Здесь драйвер шины все еще в состоянии обнаруживать специальные сигналы на шине и затем также активировать ведущее устройство соответствующим сигналом. Каждый узел может передавать сигнал активации.

LIN

Обзор

Шина LIN (локальная сеть воздействия) была разработана для удовлетворения потребностей в связи для систем класса A (см. табл. 1) с использованием самого экономичного оборудования. Типичные области применения:

- дверной модуль с дверным замком;
- приводы стеклоподъемников;
- регулировка боковых зеркал заднего вида;
- система кондиционирования (передача сигналов от элемента управления, активация вентилятора свежего воздуха).

Текущую спецификацию LIN можно найти на сайте консорциума LIN [4].

Важные особенности шины LIN:

- концепции с одним ведущим и несколькими ведомыми устройствами;
- небольшая стоимость оборудования за счет передачи данных по незкранированному однопроводному кабелю;
- самосинхронизация ведомых устройств без кварцевого генератора;
- связь в виде очень коротких сообщений;
- скорость передачи данных до 20 кбит/с;
- длина шины до 40 м, до 16 узлов.

Система передачи

Шина LIN представляет собой незкранированный однопроводный кабель. Уровень шины может принимать два логических состояния. Доминантный уровень соответствует напряжению приблизительно 0 В (масса) и представляет собой логический 0. Рецессивный уровень соответствует напряжению батареи U_{bat} и представляет собой логическую 1.

Из-за наличия разных вариантов электрических цепей уровни могут быть разными. Определение допусков на передачу и прием в области рецессивных и доминантных уровней обеспечивает стабильную передачу данных. Диапазоны допусков шире на приемном конце (рис. 9), чтобы действительные сигналы тоже можно было получать, несмотря на излучаемые помехи.

Скорость передачи по шине LIN ограничена величиной 20 кбит/с. Это компромисс между большой крутизной фронта импульсов, необходимой для синхронизации ведомых устройств, с одной стороны, и небольшой его крутизной, необходимой для улучшения EMC – с другой. Рекомендуемая скорость передачи составляют 2400, 9600 и 19200 бит/с. Минимально допустимая скорость составляет 1 кбит/с.

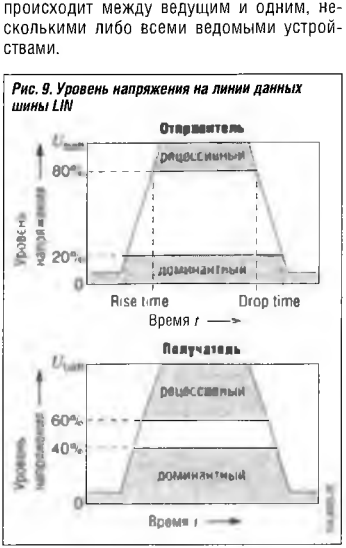
Максимальное количество узлов не регламентируется в спецификации LIN. Теоретически оно ограничено количеством доступных идентификаторов сообщений. Возможности линии и узла и крутизна фронта импульсов ограничивают сочетание длины и количества узлов сети LIN; рекомендуется не более 16 узлов.

Пользователи шины обычно располагаются в линейной топологии; однако эта топология не является обязательной.

Доступ к шине

Доступ к шине LIN обеспечивается на основе доступа «ведущий-ведомый». В сети имеется ведущее устройство, инициирующее каждое сообщение. Ведомое устройство имеет возможность ответить. Обмен сообщениями происходит между ведущим и одним, несколькими либо всеми ведомыми устройствами.

Рис. 9. Уровень напряжения на линии данных шины LIN



Во время обмена сообщениями между ведущим и ведомым устройством возможны следующие взаимосвязи:
- сообщение с ответом ведомого: ведущее устройство передает сообщение одному или нескольким ведомым устройствам и запрашивает данные (например, состояния измеренных значений);
- сообщение с инструкцией ведущего: ведущее устройство передает инструкции ведомому устройству (например, включение сервопривода);
- сообщение для использования: ведущее устройство инициирует связь между двумя ведомыми устройствами.

Протокол LIN

Фрейм данных

Информация на шине LIN встраивается в определенный фрейм данных (фрейм LIN) (рис. 10). Инициированное ведущим устройством сообщение начинается с заголовка. В поле сообщения (ответ) содержится различная информация, зависящая от типа сообщения. Если ведущее устройство передает инструкции ведомому устройству, то оно описывает поле сообщения данными, которые должно использовать ведомое устройство. В случае запроса данных адресуемое ведомое устройство описывает поле сообщения данными, запрошенными ведущим устройством.

Заголовок

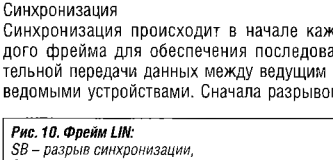
Заголовок состоит из разрыва синхронизации, поля синхронизации и поля идентификации.

Синхронизация

Синхронизация происходит в начале каждого фрейма для обеспечения последовательной передачи данных между ведущим и ведомыми устройствами. Сначала разрывом синхронизации четко определяется начало фрейма. Он состоит из не менее 13 последовательных доминантных уровней и одного рецессивного уровня.

После разрыва синхронизации ведущее устройство передает поле синхронизации, состоящее из последовательности битов 01010101. Это дает ведомым устройствам возможность адаптироваться к временной оси ведущего. Тактовый импульс ведущего устройства не должен отличаться от номинального значения более чем на ±0,5 %. Тактовый импульс ведомых устройств перед синхронизацией может иметь разброс ±15 %, если синхронизация к концу сообщения достигает уровня ±2 %. Таким образом, ведомым устройствам не нужен дорогой кварцевый генератор – они могут быть выполнены, например, с экономичной резистивно-емкостной цепью.

Рис. 10. Фрейм LIN:
SB – разрыв синхронизации,
SF – поле синхронизации;
IF – поле идентификации;
DF – поле данных;
CS – контрольная сумма



Идентификатор

Третий байт в заголовке служит идентификатором LIN. По аналогии с шиной CAN здесь используется адресация по содержанию – идентификатор дает информацию о содержании сообщения. Все подключенные к шине узлы на основании этой информации решают, намерены ли они получить и обработать сообщение или же проигнорировать его (фильтрация при приемке).

Шесть или восемь битов в поле идентификатора определяют сам идентификатор; из них получается 64 возможных идентификатора (ID). Имеются следующие значения:
- ID = 0 - 59: передача сигналов;
- ID = 60: запрос команд и диагностики от ведущего устройства;
- ID = 61: отклик ведомого устройства на ID 60;
- ID = 62: зарезервирован для связи с изготовителем;
- ID = 63: зарезервирован для будущих расширений протокола.

Из 64 возможных сообщений 32 могут содержать только два байта данных, 16 – четыре байта данных, и остальные 16 – восемь байтов данных.

Последние два разряда в поле идентификации содержат контрольные суммы, защищающие идентификатор от ошибок при передаче и неправильного распределения сообщений.

Поле данных

После передачи ведущим устройством заголовка начинается передача фактических данных. Ведомые устройства по переданному идентификатору определяют, являются ли они адресатами и, при необходимости, отправляют ответ в поле данных.

В один фрейм можно включить несколько сигналов. Здесь у каждого сигнала есть один генератор, т.е. он всегда описывается одним и тем же узлом сети. Во время работы не разрешается сопоставлять сигналу другой генератор, что возможно в других сетях с управлением по времени.

Данные в ответе ведомого устройства защищаются контрольной суммой (CS).

Описательный файл LIN

Конфигурация шины LIN, т.е. спецификация пользователей сети, сигналов и фреймов, выполняется в описательном файле LIN. Спецификация LIN для этой цели имеет подходящий язык конфигурации.

Из описательного файла LIN автоматически генерируется набор кодов на C и файлов заголовков; эти коды и файлы используются для реализации функций ведущего и ведомых устройств в ЭБУ, расположенных на шине. Таким образом, описательный файл LIN служит для конфигурации всей сети LIN. Это общий интерфейс между автопроизводителем и поставщиками ведущих и ведомых устройств.

Составление графика отправки сообщений

Таблица-график в описательном файле LIN определяет порядок и время отправки сообщений. Часто запрашиваемая информация отправляется время от времени. Когда таблица проработана, ведущее устройство снова начинает с первого сообщения. Последовательность обработки можно изменить в зависимости от режима работы (например, активна/неактивна диагностика, включено/выключено зажигание).

Таким образом, известен фрейм передачи каждого сообщения. Детерминированные характеристики гарантируются тем фактом, что все передачи инициируются ведущим устройством в случае управления доступом по принципу «ведущий-ведомый».

Управление сетью

Для минимизации тока замкнутой цепи узлы сети LIN можно переводить в спящий режим. Это можно сделать двумя способами. Ведущее устройство передает команду «перейти в спящий режим» зарезервированным идентификатором 60, либо ведомые устройства переходят в спящий режим автоматически, если в течение относительно длительного времени (4 секунды) не было передачи данных по шине. И ведущее, и ведомые устройства могут снова активировать сеть. Для этого необходимо передать сигнал активации. Он состоит из байта данных с номером 128, обозначающим содержание. После перерыва времени бита 4–64 (разграничитель активации) все узлы должны быть инициализированы и способны ответить ведущему устройству.

Ethernet, прототип Internet

Обзор

Понятие Ethernet означает семейство шин, в которых адресация, формат сообщений и управление доступом идентичны (IEEE 802, [5]). Ethernet и протокол Internet (IP) были разработаны для обмена данными между компьютерами или периферийными устройствами, которые локально разделены и у которых во время работы могут возникать реконфигурации сети из-за добавления новых пользователей или сбоя пользователей. Шины Ethernet отличаются следующими важными особенностями:

- скорость передачи данных от 10 Мбит/с до 10 Гбит/с;
- передача данных возможна по коаксиальному кабелю, витой паре, по радио или оптоволоконной линии;
- технология стандартизирована и очень широко используется;
- возможность простой вставки и удаления узлов;
- время отклика в случае с приложениями реального времени не гарантируется.

Ethernet используется в серийно выпускаемых автомобилях; например, в BMW 7-й серии, где он используется для ввода данных автомобиля в конце изготовления.

Система передачи

Варианты шины Ethernet отличаются скоростью передачи, физической конструкцией канала и шифрованием. В качестве каналов используются коаксиальные кабели, витые пары, оптоволоконные линии, радиоканалы и даже провода питания. Соответственно, различается шифрование.

Изначально в качестве передающей среды использовались коаксиальные кабели в шинной топологии. Здесь трансиверы узлов подключались к кабелю либо напрямую, либо через тройники. Сегодня широко используются двухпроводные кабели – витые пары Благодаря технологии Fast Ethernet скорость передачи была повышена с 10 Мбит/с до 100 Мбит/с, а для Gigabit Ethernet – с 1 Гбит/с до 10 Гбит/с.

Топология

Размер сети ограничивается из-за того факта, что время распространения сигнала между двумя узлами влияет на процесс арбитража. Это можно обойти путем деления на сегменты, соединяемые специальными компонентами – концентраторами и коммутаторами. Концентратор работает как усилитель, восстанавливающий идеальную форму сигнала, если она была повреждена помехой или рассеянием в среде передачи. Коммутатор проверяет правильность всех пакетов в плане контрольной суммы и направляет пакеты, без возникновения конфликтных ситуаций, на другой вывод, если по этому маршруту они могут дойти до получателя. Для этого коммутатор должен быть способен временно хранить сообщения. Помимо затрат на аппаратную часть, недостатком при использовании таких элементов является задержка потока данных. Для решения этой проблемы можно подключить узлы с разной скоростью передачи данных.

Сегодня сети обычно проектируются так, чтобы каждый узел соединялся с выходом коммутатора, т.е. чтобы не было прямой связи между узлами. Сами коммутаторы соединяются через коммутатор более высокого уровня таким образом, чтобы получилась древообразная структура.

Протокол Ethernet

Доступ к шине

Для передачи узел проверяет, есть ли сигналы на шине. Когда он определит, что линия свободна, он начинает передачу. Из-за того, что на распространение сигнала между двумя узлами уходит определенное время, может возникнуть ситуация, когда два узла, посчитав линию свободной, практически одновременно начинают передачу. Переданные таким образом фреймы разрушаются. Узлы обнаруживают это, прерывают передачу и ждут определенное время (оно у каждого узла свое), прежде чем предпримут очередную попытку передачи. Разрушение фреймов уменьшает эффективную скорость передачи до приемлемой, при условии, что шина используется не слишком интенсивно.

Этот процесс арбитража ограничивает длину сообщений и время распространения сигнала, т.е. дальность. Приоритетов у сообщений нет. Поэтому максимальная длительность передачи не может быть гарантирована.

Каждый узел из всех сообщений принимает для дальнейшей обработки те, в которых в качестве адреса получателя указан их собственный.

Фрейм данных

На рис. 11 показана немного упрощенная структура фрейма данных. Началом является периодическая битовая последовательность (101010–1011), генерирующая сигнал для синхронизации получателя. В сообщениях содержатся адреса отправителя и получателя. Каждая сетевая карта имеет свой уникальный адрес. Узлы-получатели сравнивают адрес получателя со своим собственным и при их совпадении принимают фрейм. При широковещании может иметь место обращение сразу к нескольким или всем получателям.

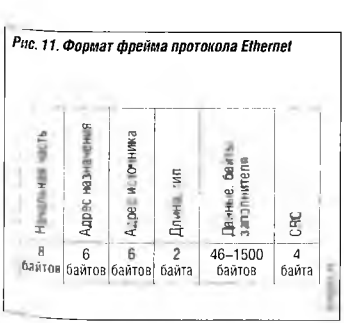


Рис. 11. Формат фрейма протокола Ethernet

PSI5

Обзор

Интерфейс периферийных датчиков 5 (PSI5) – цифровой интерфейс, созданный консорциумом PSI ([6]) для систем автомобильных датчиков и по области применения относимый к классу A (см. табл. 1). PSI5 базируется на уже существующих интерфейсах для периферийных датчиков подушек безопасности, но разработан в качестве открытого стандарта, который может использоваться и внедряться без дополнительной платы. Описанные ниже технические характеристики, низкие затраты на реализацию и низкие дополнительные затраты по сравнению с подключением аналоговых датчиков делают PSI5 привлекательным вариантом для систем автомобильных датчиков.

Система передачи

PSI5 имеет двухпроводной интерфейс, в котором одни и те же провода используются и для питания датчиков, и для передачи данных с фазовым шифрованием. Для этой цели устройство управления передачей данных по шине в ЭБУ регулирует напряжение датчика. Передача данных от датчика к ЭБУ выполняется путем модуляции тока питающих проводов. Таким образом достигаются очень хорошая электромагнитная совместимость и низкий уровень электромагнитного излучения. Может поддерживаться широкий диапазон питающего тока датчиков.

Различные режимы работы PSI5 определяют топологию и параметры связи между ЭБУ и датчиками (рис. 12):

- режимы связи: асинхронный режим можно использовать для однонаправленного соединения «точка-точка». В трех синхронных режимах (параллельном, универсальном и с последовательным опросом) несколько датчиков могут сообщаться с устройством управления передачей данных по шине двунаправленно и с использованием процессов TDMA;
- величина слова данных: PSI5 поддерживает следующие величины слова данных – 8, 10, 16, 20 и 24 бита;
- обнаружение ошибок: ошибки можно обнаруживать либо с помощью контрольного разряда с проверкой на четность или с помощью трех битов контрольной суммы CRC;
- время цикла в мкс;
- количество интервалов на цикл;

– скорость передачи данных либо стандартная – 125 кбит/с, либо 189 кбит/с.

Например, режим работы «PSI5-P10P-500/3L» обозначает параллельный синхронный режим с 10 битами на слово данных и проверкой четности для обнаружения ошибок. Данные передаются каждые 500 мкс с тремя интервалами в каждом цикле и с низкой скоростью передачи битов.

Во время передачи данных от датчика к ЭБУ «низкий уровень» обозначается нормальным (без колебаний) током датчика. «Высокий уровень» создается увеличивающейся нагрузкой датчика по току (обычно 26 мА). Эта модуляция тока обнаруживается приемником в ЭБУ.

Каждый пакет данных PSI5 состоит из N битов, из которых в каждом случае есть два начальных бита и один бит проверки четности (или три бита CRC) и N 3 (или N 5) битов данных. Биты данных передаются с самым незначительным битом (LSB) в начале. Обнаружение ошибок с помощью бита проверки четности рекомендуется для восьми или десяти битов, три бита CRC для более длинных слов данных.

В сообщении PSI5 диапазоны данных и значений имеют разный смысл. Один диапазон служит для передачи выходных сигналов датчика (≈94 %), один диапазон – для сообщений о состоянии и ошибках (≈3 %) и один диапазон – для данных инициализации (≈3 %).

После каждого запуска или сброса из-за падения напряжения датчик проводит внутреннюю инициализацию, после чего датчик переходит в выполнимый режим.

В то время как связь в направлении от датчика к ЭБУ осуществляется посредством сигналов тока, при связи в направлении от ЭБУ к датчикам используется модуляция напряжения в питающих проводах. Логическая единица представлена сигналом синхронизации, а логический ноль – отсутствием ожидаемого сигнала синхронизации в обозначенном интервале. Сигнал синхронизации состоит из четырех фаз (рис. 13):
– начало синхронизации (номинально 3 мкс, < 0,5 В);
– рост синхронизации (номинально 7 мкс, < 0,5 В);
– постоянная синхронизация (номинально 9 мкс, < 3,5 В);
– спад синхронизации (номинально 19 мкс, < 3,5 В).

Рис. 12. Обозначение режимов работы PSI5:
A – асинхронный режим,
P – параллельный, синхронный режим;
U – универсальное соединение;
D – шина с последовательным опросом,
P – разряд проверки четности;
CRC – периодический резервный контроль;
L – низкий битрейт;
H – высокий битрейт

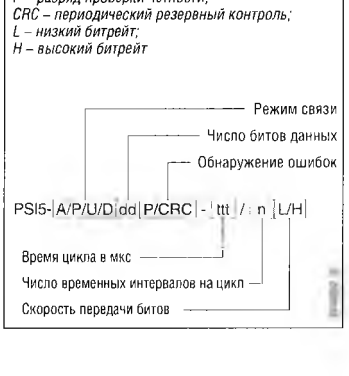
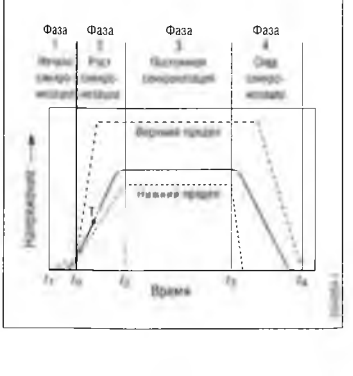


Рис. 13. Сигнал синхронизации PSI5:
T – точка срабатывания



Шина MOST

Обзор

Области применения

Шина MOST (транспорт для медиа-ориентированных систем) была специально разработана для объединения в сеть мультимедийных систем автомобиля (шина информационно-развлекательных систем). Наряду с классическими развлекательными функциями, такими как радиоприем и воспроизведение CD, информационно-развлекательные системы имеют функции видео (DVD и ТВ), навигации и доступа к мобильной связи и информации. Шина MOST поддерживает логическое объединение в сеть до 64 устройств и обеспечивает фиксированный и резервный диапазоны передачи. Шина MOST определяет протокол, устройства, программное обеспечение и системные слои. Шина MOST совместно разрабатывается и стандартизируется автопроизводителями и поставщиками в рамках MOST Cooperation [7]. При скорости передачи данных более 10 Мбит/с шина MOST относится к шинам класса D.

Для передачи данных шина MOST поддерживает следующие каналы передачи:

- канал для команд управления транспортировкой;
- мультимедийный канал (синхронный канал) для передачи аудио- и видеоданных;
- канал пакетных данных (асинхронный канал), например, для передачи данных конфигурации для системы навигации и обновления программного обеспечения в блоках управления.

Конструктивные требования

Передача мультимедийных данных, как аудио, так и видео, требует высокой скорости передачи и синхронизации передачи между источником и получателем, а также между несколькими получателями.

Система передачи

Физический слой

Стандарт MOST определяет как оптическую, так и электрическую технологии физического слоя (слоя передачи). Слой оптической передачи широко распространен и в настоящее время в качестве транспортной среды использует оптоволоконные кабели (полимерное оптоволокно, POF) из полиметилметакрилата. Они имеют диаметр 1 мм и используются в сочетании со светодиодами и кремниевыми фотодиодами в качестве приемников.

Отличительной особенностью технологии MOST 50 является её пригодность для электрической передачи данных. Это позволяет передавать данные по незкранированным кабелям с витой медной парой (UTP). В то время как технология MOST 25 продолжала развиваться в Европе и получила распространение в Корее, японский рынок предпочитает MOST 50 – второе поколение мультимедийного стандарта.

Идентификационный номер, например, в случае MOST 25, означает скорость передачи около 25 Мбит/с. Точная скорость передачи зависит от используемой системой частоты амплитудно-импульсной модуляции. При частоте амплитудно-импульсной модуляции 44,1 кГц фрейм MOST передается 44100 раз в секунду; длина фрейма 512 бит означает скорость передачи 22,58 Мбит/с. Для MOST 50 та же самая частота амплитудно-импульсной модуляции означает двойную скорость передачи, так как длина фрейма составляет 1024 бита. Сейчас доступны и более высокие скорости передачи данных – 150 Мбит/с (MOST 150).

Особенности MOST 150

В дополнение к более высокой пропускной способностью – 150 Мбит/с, MOST 150 содержит изохронный механизм транспортировки для эффективной передачи сжатых данных видео высокого разрешения (HD). Транспортные потоки MPEG (эксперная группа по движещемуся изображению) здесь передаются напрямую. С помощью соответствующего видеокодека на базе MPEG4 можно передавать видео с разрешением до 1080 строк), например, с проигрывателей BluRay. Наряду с этим, MOST 150 обеспечивает канал Ethernet для эффективной передачи пакетных данных IP (IP = протокол Internet).

В отличие от протокола MAMAC (асинхронное управление доступом к среде MOST), используемого с технологией MOST 25, канал Ethernet способен передавать фреймы Ethernet.

Канал Ethernet передает неизмененные блоки данных Ethernet, что означает возможность эффективной интеграции программных пакетов и приложений в области потребительской электроники и информационных технологий в автомобили за гораздо более короткие инновационные циклы. Таким образом, пакеты TCP/IP и протоколы, использующие TCP/IP (TCP = протокол управления передачей) могут сообщаться через MOST150 без изменений.

Контроллер сетевого интерфейса (NIC) шины MOST – аппаратный контроллер, отвечающий за управление физическим слоем и имеющий важные механизмы передачи.

Протокол

Передача данных

Передача данных по шине MOST организована во фреймах данных, создаваемых синхронизирующим ведущим устройством с фиксированной скоростью передачи и передаваемых дальше устройствами в кольце.

Фреймы данных

Синхронизирующее ведущее устройство обычно создает фреймы данных с тактовой частотой 44,1 кГц, реже – 48 кГц. Таким образом, размер фреймов данных определяет скорость шины MOST. В технологии MOST25 размер фреймов данных составляет 512 бит (рис. 1). Синхронные и асинхронные области MOST25 совместно используют 60 байтов фрейма данных. Разграничение между синхронными каналами и асинхронным каналом определяется значением граничных дескрипторов с разрешением 4 байта. Синхронная область должна иметь не менее 24 байтов (шесть стереоканалов). Это означает, что для синхронной области разрешается от 24 до 60 байтов, а для асинхронной области – от 0 до 36 байтов. Начало используется для синхронизации; для обнаружения битовых ошибок используется бит проверки четности.

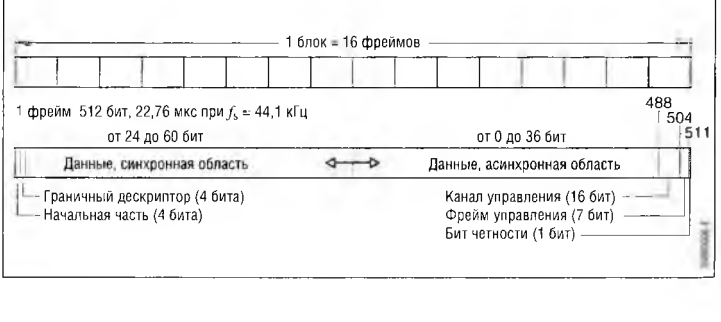
Передача управляющих сообщений

Управляющий канал используется для сигнализации состояний устройства и сообщений, необходимых для администрирования системы. Чтобы управляющий канал не занимал слишком большую часть пропускной способности на один фрейм, он распределяется на 16 фреймов, образующих блок. Каждый фрейм транспортирует два байта (рис. 1). Чтобы обеспечить распознание начала блока, начальная часть первого фрейма в блоке имеет специальную битовую комбинацию. В случае MOST25 управляющий канал имеет общую пропускную способность 705,6 кбит/с.

Передача мультимедийных данных

Синхронные каналы используются для передачи аудио- и видеоданных в реальном времени, при этом обмен данными контролируется соответствующими командами в канале управления. Синхронному каналу можно выделить определенную пропускную способность, с разрешением в один байт фрейма данных. Например, для стерео аудиоканала с разрешением 16 бит требуется 4 байта. В случае с MOST25, в зависимости от значения граничного дескриптора, для синхронных каналов доступно не более 60 байт; это соответствует 15 стерео аудиоканалам.

Рис. 1. Структура MOST



Передача пакетных данных

Данные передаются пакетами по асинхронному каналу. Поэтому он подходит для передачи информации, не имеющей фиксированной скорости передачи данных, но иногда внезапно требующей высокой скорости передачи. Примерами могут служить передача информации о треке MP3-плеера или обновление программного обеспечения.

В случае с MOST 25 асинхронный канал имеет общую пропускную способность до 12,7 Мбит/с и в настоящее время поддерживает два режима: более медленный 48-байтовый режим, где в каждом пакете для передачи чистых данных имеется 48 байт, и 1014-байтовый, более сложный в реализации. Чтобы обеспечить надежную передачу и управление потоком для традиционно больших объемов данных, передаваемых по асинхронному каналу, обычно используется дополнительный транспортный протокол (протокол канального уровня); он реализуется в слое драйвера на более высоком уровне. Это либо протокол MOST High (MHP), специально разработанный для шины MOST, или обычный протокол TCP/IP, размещаемый в соответствующем адаптационном слое – асинхронного управления доступом к среде MOST(MAMAC).

Рис. 2. Кольцевая структура шины MOST



Топология

Шина MOST имеет кольцевую структуру (рис. 2). Это система потока данных от одной точки к нескольким (т.е. поток данных имеет один источник и несколько получателей) и поэтому все устройства используют общую системную частоту, получаемую из потока данных. Таким образом, устройства синфазны и могут передавать все данные синхронно. Это позволяет обойтись без механизмов буферизации и обработки сигналов. Определенное устройство выполняет роль «синхронизатора» и генерирует фреймы данных, используемые для передачи данных, с которыми синхронизируются другие устройства.

Адресация

Обращение к устройствам на шине MOST происходит через 16-битовый адрес. Существуют различные типы адресации: логическая, физическая и групповая адресация для одновременного обращения к определенной группе блоков управления.

Административные функции

Стандарт MOST определяет механизмы управления, необходимые для работы системы MOST. Эти механизмы описаны ниже.

Сетевое ведущее устройство

Сетевое ведущее устройство реализуется посредством маркированного устройства в системе MOST и отвечает за конфигурацию системы. В современных системах сетевое ведущее устройство обычно реализуется с использованием головного устройства (т.е. панели управления) информационно-развлекательной системы. Зачастую это устройство одновременно является синхронизатором. Другие устройства системы MOST в этом контексте называют ведомыми.

Подключающее ведущее устройство

Подключающее ведущее устройство управляет синхронными подключениями, существующими в системе MOST в любой отдельно взятый момент.

Прикладной уровень MOST

Для передачи команд управления, информации о состоянии и событий стандарт MOST определяет соответствующий протокол на уровне приложений. Этот протокол позволяет инициировать определенную функцию интерфейса приложения (т.е. функционального блока), обеспечиваемую любым устройством в системе MOST.

Протокол для управляющих сообщений MOST включает следующие элементы управляющего сообщения:

- адрес устройства в системе MOST (DeviceID);
- идентификатор функционального блока (FBlockID), реализованного этим устройством и его идентификатор в системе MOST (InstID);
- идентификатор для функции, вызываемой в рамках функционального блока (FunctionID);
- тип операции (OpType).

Функциональный блок

Функциональный блок (FBlock) определяет интерфейс определенного приложения или системного сервиса. Каждый получатель и источник мультимедийных данных соотносится с функциональным блоком, предоставляющим соответствующие функции для их администрирования. Поэтому функциональный блок может иметь несколько источников и получателей, пронумерованных номерами источников и получателей.

Функциональный блок имеет функции, предоставляющие информацию о количестве и типе источников и получателей (SyncDataInfo, SourceInfo и SinkInfo). Каждый функциональный блок с каким-либо источником имеет функцию «размещения» для запроса синхронного канала и подключения к нему источника. Соответственно, функциональный блок с получателем имеет функцию «подключение» для подключения получателя к определенному синхронному каналу и функцию «отключение» для разрыва этого подключения.

Обращение к функциональному блоку осуществляется через 8-битовый идентификатор FBlockID, определяющий тип блока, и дополнительный 8-битовый идентификатор InstID.

Классы функций

Для стандартизации способа, которым определяются функции, стандарт MOST предусматривает ряд классов функций. Они определяют свойства функции и допустимые операции.

Области применения

Наряду с определением нижних уровней, необходимых для передачи данных, стандарт MOST определяет интерфейсы для типичных областей применения в области автомобильных информационно-развлекательных систем, например, CD-чейнджера, усилителя или радиоприемника.

Функциональные блоки, определенные организацией MOST Cooperation, перечислены в каталоге функций.

Стандартизация

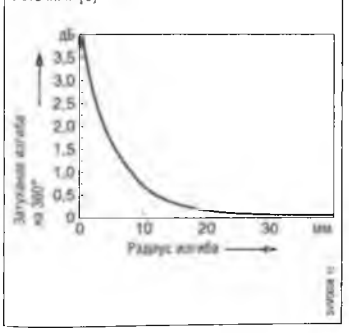
Стандарт MOST поддерживается организацией MOST Cooperation, которая также публикует соответствующие спецификации. Спецификации можно найти на сайте MOST Cooperation [7].

Организация MOST Cooperation была учреждена в 1998 году концернами BMW, Daimler, Becker Radio и OASIS Silicon Systems с целью стандартизации технологии MOST.

Оптические волокна
(оптические волноводы)
Конструкция
Оптические волокна пропускают электромагнитные волны в ультрафиолетовом (УФ), видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра. Они изготавливаются из кварца, стекла или полимеров, обычно в виде волокон с сердцевиной, коэффициент преломления которой выше, чем у оболочки. Таким образом, попадающий луч света проходит в зону сердцевины и удерживается в ней за счет рефракции или полного отражения. В зависимости от характера изменения коэффициента преломления, различают четыре типа волокон:
- со ступенчатым изменением преломления и резко выраженной границей между сердцевиной и оболочкой;
- с плавным изменением коэффициента преломления в зоне сердцевины;
- с очень небольшим диаметром сердцевины (одномодовое волокно);
- с заполненными воздухом капиллярами, расположенными вокруг сердцевины через определенные промежутки (волокно со световым кристаллом).

В зависимости от расположения кривая показателя преломления может иметь вид кривой со ступенчатым изменением преломления или кривой одномодового волокна. Полимерные волокна бывают только со ступенчатым изменением преломления.

Рис. 3. Затухание изгиба на 360° в зависимости от радиуса изгиба
Источник: [8]



Свойства
Стеклооптическое волокно имеет высокую степень прозрачности в переходном диапазоне от УФ к ИК. Особо низкое затухание наблюдается при длинах волн 850, 1310 и 1550 нм. Синтетические волокна поглощают волны длиннее 850 и короче 450 нм. Разности дисперсии и продолжительности распространения различных мод вызывают возрастающее расширение импульсов, поскольку увеличение длины волокна ограничивает ширину полосы частот. В волокнах со световыми кристаллами путем соответствующего микроструктурирования сердцевины можно влиять на рассеяние и эффективность нелинейных эффектов для достижения нужных результатов.

Световоды могут быть использованы в диапазоне рабочих температур от –40 °C до 135 °C; специальные волокна работоспособны до 800 °C.

Области применения
Основной областью применения световодов является передача данных. Синтетические кабели предпочитаются для LAN (локальных сетей) и шины MOST в автомобилях. Необходимое соответствие радиусов изгиба означает, что установка в автомобилях является критичной. Если радиус изгиба слишком мал, то затухание будет слишком большим (рис. 3).

Оптические волокна все чаще используются в автомобильных лампах и датчиках. Волоконно-оптические датчики не создают полей рассеяния, не образуют искр, не чувствительны к помехам.

Список литературы
[1] ISO 11898: Road vehicles – Controller Area Network, parts 1 to 5.
[2] SAE J 1939: Recommended Practice for a Serial Control and Communications Vehicle Network.
[3] www.flexray.com.
[4] http://www.lin-subbus.org/.
[5] http://www. IEEE802.org/.
[6] http://www.psi5.org/.
[7] http://www.mostcooperation.com.
[8] Grzemba, A. (редактор): MOST: Das Multimedia-Bussystem f r den Einsatz im Automobil, Franzis-Verlag, 2007.
[9] Grzemba, A. (редактор): MOST: The Automotive Multimedia Network, Franzis-Verlag, 2008.

Архитектура электронных систем

Обзор

В связи с ростом требований к безопасности, комфорту, уровню развлечений и охране окружающей среды электронные системы в автомобилях получают все больше функций и характеризуются высоким уровнем сложности. Для сохранения этого уровня в будущем требуются самые современные технологии, методы и инструменты системной архитектуры.

История

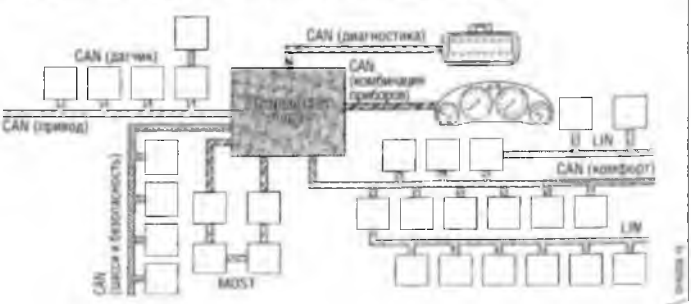
На протяжении многих десятилетий в истории автомобилестроения использовалось совсем небольшое количество электрических систем: зажигание, освещение, стеклоочистители, звуковой сигнал, датчик уровня топлива, различные индикаторы и радиоприемник. Полупроводники – за исключением радиоприемников – изначально использовались только для выпрямления (генератор постоянного тока был заменен генератором переменного тока лишь в 1963 году) и затем для электронного управления (транзисторное зажигание появилось в 1965 году).

Реализовать некоторые автомобильные функции электромеханическими средствами и дискретными электронными компонентами либо не удалось вовсе, либо удалось лишь при несопоставимо высокой сложности. К примеру, первая электронная антиблокировочная система (ABS) была разработана еще в 1970 году, но так и не дошла до серийного производства из-за своего размера, массы и стоимости. К середине 70-х годов развитие интегральных схем для широкого спектра областей применения дошло и до автопрома и вызвало революционные изменения в автомобильной электронике.

Один из первых примеров объединения электронных систем в сеть появился при разработке системы управления тяговым усилием (TCS). Это объединение в сеть было изначально реализовано чисто механическими средствами. Дроссельная заслонка в воздухозаборной системе ДВС была оснащена устройством, которое можно было активировать непосредственно через систему управления тяговым усилием. Системе управления двигателем было невозможно распознать, чем вызвано перемещение дроссельной заслонки – нажатием педали газа или вмешательством системы управления тяговым усилием.

Следующим этапом стала реализация электронного подключения к блоку управления двигателем через интерфейс ШИМ (широтно-импульсной модуляции) для улучшения динамической реакции. Его можно было использовать для передачи сигнала на блок управления двигателем для уменьшения крутящего момента двигателя. Тогда оно было реализовано в виде дросселирования

Рис. 1. Соединение ЭБУ между собой в современном автомобиле среднего класса



подачи воздуха, уменьшения впрыска или опережения момента зажигания.

Из-за постоянного ужесточения требований к составу отработавших газов те возможности, что имелись на момент соединения системы управления тяговым усилием и системы управления двигателем были уже недостаточны. Теперь требовалось сообщить системе управления двигателем, как уменьшение крутящего момента, запрашиваемое системой управления тяговым усилием, осуществляется в воздушном, топливном каналах или цепи зажигания. Поэтому было необходимо создать более мощный интерфейс, через который система управления тяговым усилием могла бы передать системе управления двигателем запрос на необходимый крутящий момент и динамическую реакцию. И наоборот, фактический момент, обороты двигателя и резерв настройки тока должны были передаваться на блок управления TCS. Это оказалось сложно и дорого в плане количества проводов, необходимых для передачи этих разных данных через дискретные и, к примеру, ШИМ-интерфейсы. Система шин CAN (сеть контроллеров) была представлена в 1991 году в качестве альтернативы дискретным проводам. Так был заложен фундамент для современного объединения автомобильных систем в сеть.

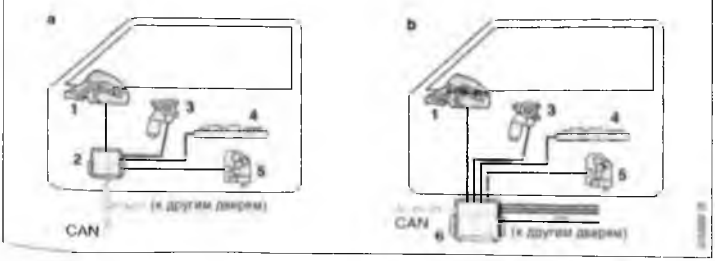
Технология сегодняшнего дня

В современных автомобилях практически все ЭБУ прямо или косвенно (например, через шлюзы) соединены друг с другом (рис. 1). Объединение в сеть дошло до того, что 60 и более ЭБУ сообщаются между собой по нескольким шинам CAN и другим шинам – FlexRay, MOST (транспорт для медиа ориентированнх систем) и LIN (локальная сеть взаимодействия). Так, например, блок управления системы динамической стабилизации (ESP) передает в сеть информацию о скорости автомобиля. Автомобильный радиоприемник может использовать эту информацию, к примеру, для адаптации громкости к скорости автомобиля.

Благодаря объединению ЭБУ в мощную сеть можно реализовать множество новых функций без какого-либо дополнительного оборудования, т.е. исключительно путем обмена данными и с помощью программного обеспечения. Одним из примеров служит открывание дверных окон путем более длительного нажатия кнопки на брелке дистанционного управления. Таким образом, например, можно равномерно вентилировать салон летом, когда открываются двери. Для этого блоки стеклоподъемников и система центрального запирания обмениваются необходимой информацией. Программное обеспечение запускается либо на ЭБУ системы центрального запирания, либо на ЭБУ стеклоподъемников. Во многих автомобилях эти две системы имеют общий ЭБУ, в этом случае новые программные функции можно реализовать даже еще проще.

Это демонстрирует тенденцию, изначально встречавшуюся в кузовной электронике: интеграция отдельных ЭБУ с образованием центрального ЭБУ (рис. 2). Эти центральные ЭБУ соединяются с датчиками и исполнительными механизмами либо через дискретные, аналоговые провода, либо через шины. Последние значительно уменьшают количество

Рис. 2. Сравнение децентрализованного и централизованного управления:
a – децентрализованное управление; b – централизованное управление, 1 – зеркало, 2 – ЭБУ двери; 3 – блок стеклоподъемника, 4 – рабочий элемент, 5 – механизм запирания, 6 – центральный ЭБУ



штырьков в разъеме ЭБУ и, соответственно, стоимость проводки. Датчики и исполнительные механизмы, подключаемые через шины, также называют «интеллектуальными». Для подключения к шине они должны иметь электронную схему, которая во многих случаях также включает в себя функции кондиционирования сигнала датчика или функции драйвера исполнительного органа. Но в то же время использование электронной схемы означает рост затрат на датчики и исполнительные механизмы. Таким образом, минимизация суммарных затрат, в том числе на электронику и провода, является важной задачей при определении концепций организации сети.

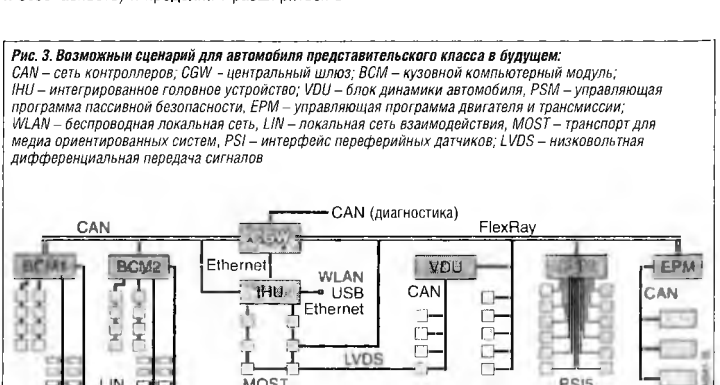
К примеру, логическая цепь для функции защиты пальцев у блоков стеклоподъемников во многих исполнениях расположена прямо в ЭБУ на электроприводе стеклоподъемника. Сигнал активации нормальной работы, например, при упомянутом выше открывании стекол с брелка, передается по шине LIN с центрального ЭБУ кузовной электроники (BCM). В этом отношении речь идет о серверной архитектуре.

Тенденции развития

Упомянутая выше централизация и использование интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов в области кузовной электроники нашла распространение в других функциональных областях автомобиля (информация для водителя, динамика движения и безопасность) и продолжит расширяться в ближайших поколениях автомобилей. В дополнение к комбинации функций различных ЭБУ в одном центральном ЭБУ используются локальные главные компьютеры (рис. 3). ЭБУ интеллектуальных датчиков и исполнительных органов автомобиля зависят от этих главных компьютеров (BCM, IHU и т.д.). Функции, требующие высокой степени интеграции команд управления информацией в основном воспроизводятся на этих главных компьютерах в программном обеспечении. Чтобы эти функции могли работать и на ЭБУ других платформ, требуется стандартная программная архитектура. Добиться этого можно посредством инициативы AUTOSAR (см. раздел «AUTOSAR»).

Локальные главные компьютеры соединяются между собой через мощный «хребет» – на рис. 3 показаны шины CAN и FlexRay, соединенные через центральный шлюз. Центральный доступ к сети для диагностики и загрузки ПО здесь также производится через шлюз.

Рис. 3. Возможный сценарий для автомобиля представительского класса в будущем:
CAN – сеть контроллеров; CGW - центральный шлюз; BCM – кузовной компьютерный модуль; IHU – интегрированное головное устройство; VDU – блок динамики автомобиля, PSM – управляющая программа пассивной безопасности, EPM – управляющая программа двигателя и трансмиссии; WLAN – беспроводная локальная сеть, LIN – локальная сеть взаимодействия, MOST – транспорт для медиа ориентированных систем, PSI – интерфейс переферийных датчиков; LVDS – низковольтная дифференциальная передача сигналов



Архитектура электронных систем

Архитектура

С увеличением количества электроники в автомобиле растет и потребность в мощных процессах разработки и методах их описания для архитектуры электрических и электронных систем.

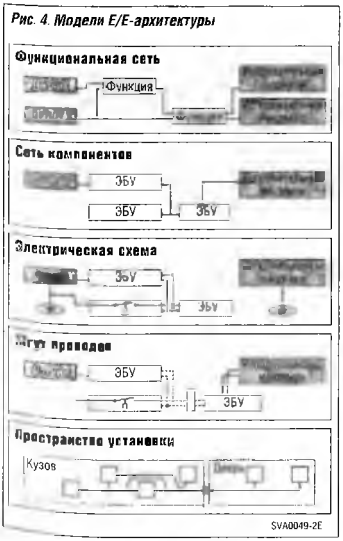
Понятие «архитектура» обычно обозначает искусство строительства. В строительстве архитектор проектирует здание, создавая чертежи в различных проекциях, и строители-подрядчики выполняют работу в соответствии с пожеланиями заказчика и граничными условиями. Проект абстрагируется от реальности в плане конкретных аспектов (например, геометрических условий или электропроводки). Здание может быть возведено окончательно на основании проектов всех необходимых аспектов.

Применительно к автомобилям это называется «E/E-архитектурой». «E/E» означает электрические и электронные аспекты автомобиля. «Проекты» E/E-архитектора в дальнейшем мы будем называть общим понятием «модель».

У автопроизводителей и их поставщиков разные взгляды на то, сколько и каких моделей требуется для полного описания электрических и электронных систем автомобиля. Представленные ниже модели хорошо зарекомендовали себя на практике и являются необходимой основой для описания объема E/E-архитектуры.

Понятие архитектуры часто используется в литературе и публикациях для обозначения самих моделей. Здесь четко различают рабочую операцию (разработка архитектуры) и представление результата (модель).

Рис. 4. Модели E/E-архитектуры



Модели E/E-архитектуры

Модели E/E-архитектуры отражают результаты различных аспектов интеграции электронных систем в автомобиле (рис. 4). Эти аспекты обычно рассматриваются одновременно, так как и геометрия (структура кузова) и новые системы анализируются на этапе разработки концепции. В процессе разработки автомобиля может возникнуть ситуация, когда электронная система в выбранной технологии не вписывается в имеющееся пространство. В этом случае нужно найти компромисс.

Функциональная сеть

Функциональная модель

Функциональные модели – предварительная стадия конкретных технических систем. Они описывают элементы, необходимые для реализации необходимых характеристик, не вдаваясь в конкретную технологию. На примере рулевого управления с наложением это означает разбивку на такие элементы, как:

- переменное передаточное отношение;
- управление стабилизацией;
- модель автомобиля;
- исполнительный механизм;
- автомобиль;
- водитель.

Функциональные модели (рис. 5) обычно создаются в виде схемы прохождения сигналов по DIN 19226 ([5]).

Сеть компонентов

Технологическая модель

Технологическая модель описывает, какая техническая реализация используется для указанных элементов без объединения их в модули, такие как электронные блоки управления (ЭБУ). Создаются «технологические блоки».

Таким образом, фильтрацию сигналов можно реализовать с дискретными компонентами с помощью цифровой цепи или фильтрующего программного обеспечения в микроконтроллере. С помощью цифровой цепи или микроконтроллера можно даже реализовать функцию контроллера. Стабилизации напряжения можно добиться либо с помощью сглаживающего конденсатора, либо конвертера напряжения DC/DC.

На выбор технической реализации с одной стороны влияет функция, а с другой – затраты. Прежде чем сгруппировать технологические блоки в модули в виде ЭБУ, первым делом нужно попытаться найти синергизм с технологическими блоками, интегрируемыми в будущем. Создается технологическая активная цепь (рис. 6). Если, к примеру, имеется конкретная сенсорная технология для звена активной цепи, сигнал которого нужен другой активной цепи, то она тоже будет использоваться. Это происходит даже при переопределении этого датчика под дополнительного пользователя, т.е. при менее строгих требованиях, например, к дальности приема сигналов или к точности.

Вместе с тем, важно хранить исходное требование в базе данных, так как этого синергизма может не оказаться в другом автомобиле.

В автомобильной промышленности для описания оборудования обычно используется номенклатура по DIN EN 60617 ([1]).

Узловая модель

Звенья технологических активных цепей объединяются в группы в различных местах, называемых узлами. Здесь поддерживается строгое соблюдение оптимальных затрат на интеграцию технологических блоков. Например, делаются попытки интеграции программных частей нескольких технологических активных цепей на общем микроконтроллере. Там, где это возможно, используются сигналы датчиков и исполнительные механизма Но история показывает, что замечательного синергизма можно добиться даже

Рис. 5. Схема протекания сигнала со стандартными элементами на примере рулевого управления с наложением: *δ – угол поворота рулевого колеса; $\delta_{Steering\ wheel}$ – рулевого колеса, δ_{Sum} – суммированный; $\delta_{Superimposition}$ – наложенный; ψ – скорость вращения вокруг вертикальной оси ($\psi_{Vehicle}$ – автомобиля, $\psi_{Setpoint}$ – заданное значение)*

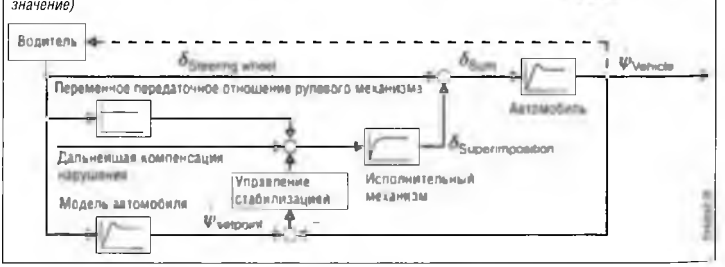
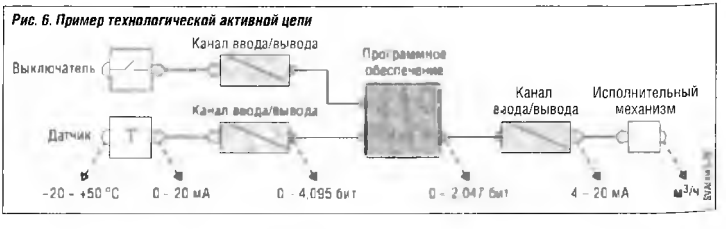


Рис. 6. Пример технологической активной цепи



в области механики – например, в создании вакуума для пневматического усилителя тормозов через впускной трубопровод двигателя с искровым зажиганием.

Аппаратная модель ЭБУ

Эта модель описывает структуру электронного оборудования ЭБУ. Она создается путем отнесения конкретных электронных компонентов из технологических активных цепей электронному модулю в узле. Поэтому ЭБУ, вообще говоря, является сборным пунктом электронных компонентов различных систем, «интеграционной платформой».

Программное обеспечение для управления различными системами из различных источников (автопроизводителей или их поставщиков) интегрируется в микроконтроллеры, размещенные в ЭБУ. Путем объединения ЭБУ в сеть можно реализовывать сложные распределенные функции, использующие датчики и исполнительные механизмы из различных мест установки в автомобиле.

На стадии разработки для электрических и электронных компонентов ЭБУ изначально используются традиционные электрические схемы. Затем определяется механика ЭБУ, дизайн и технология подключения. Модель на ранней стадии разработки ограничивается очень грубым представлением.

Программная модель ЭБУ

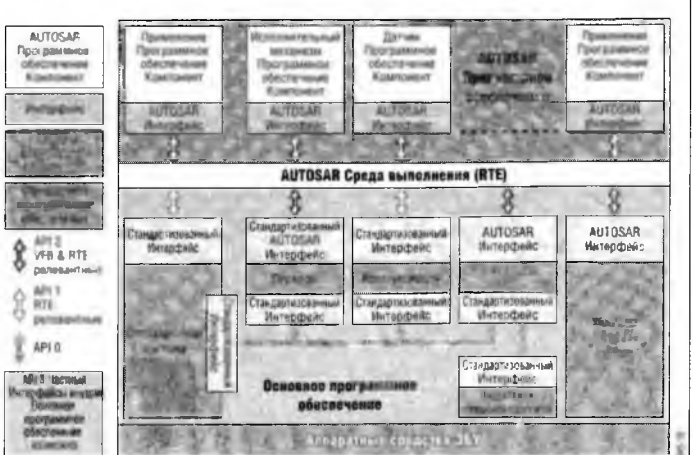
Из классической информационной технологии (для систем персональных компьютеров) имеется несколько признанных методов разработки архитектуры программного обеспечения с соответствующими моделями (например, Product Line Approach). Однако до сих пор не было разработано стандарта на разработку архитектуры программного обеспечения в автомобилестроении. С появлением стандарта AUTOSAR архитектура программного обеспечения в автомобиле в настоящее время определяется непосредственно.

Стандарт AUTOSAR определяет структуру программного обеспечения близко к уровню аппаратной части и интерфейсы между функциями приложений (рис. 7). Кроме того, AUTOSAR определяет стандартизированные форматы обмена, поддерживаемые популярными инструментами моделирования.

Различают базовое и прикладное программное обеспечение. Блоками базового программного обеспечения являются, например, драйверы устройств, программное обе-

Рис. 7. Изображение архитектуры AUTOSAR

Рисунок соответствует английским терминам на иллюстрации из спецификации [3]



спечение для связи, операционная система и аппаратная абстракция.

Сетевая модель связи

Поскольку все технологические блоки автомобиля на предыдущих этапах были распределены между ЭБУ, мы получаем сеть этих ЭБУ с их коммуникационными взаимосвязями. Сетевая модель связи представляет все ЭБУ в автомобиле, подключенные к шине и, соответственно, прямо или косвенно соединенные друг с другом.

Каждый сигнал, передаваемый между двумя или несколькими ЭБУ, относится к подходящей шинной системе. В этом плане AUTOSAR определяет стандартизированные форматы обмена, позволяющие описать связь по шине. Формат обмена AUTOSAR, начиная с версии 3.0, содержит стандарт ASAM FIBEX ([4]).

Электрическая схема

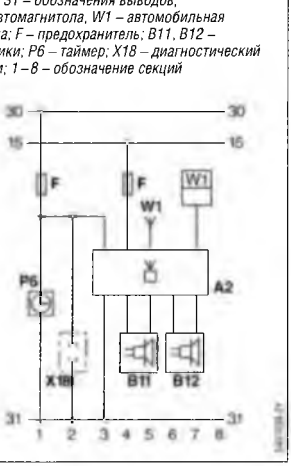
Сетевая модель энергоснабжения

Отнесение технологических блоков к ЭБУ и модулям датчиков и исполнительных механизмов также привело к появлению сети электрических нагрузок/потребителей, требующей подходящего энергоснабжения. С одной стороны, важно защитить отдельные электрические цепи, чтобы короткое замыкание не повлияло на всю сеть. С другой стороны, не на все цепи должна подаваться электроэнергия в каждом рабочем режиме. Для этого был введен принцип «выводов». К примеру, на вывод 15 электроэнергия подается только при включении зажигания.

Электрическая схема (рис. 8) показывает электрическое соединение и защиту предохранителями отдельных модулей без учета монтажного положения. Здесь можно увидеть цвета проводов (на рисунке не показаны) и соответствие выводу или предохранителю. Выводы обозначаются по DIN 72552 ([2]).

Плюс напряжения питания обычно изображается в верхней половине, а минус (масса) – в нижней.

Рис. 8. Электрическая схема на примере автомагнитолы:
15, 30, 31 – обозначения выводов; A2 – автомагнитола, W1 – автомобильная антенна; F – предохранитель; B11, B12 – динамики; P6 – таймер; X18 – диагностический разъем; 1–8 – обозначение секций



Жгут проводов и пространство установки

Эта модель группирует электрические и электронные модули в определенном месте в автомобиле (рис. 9). Таким образом, провода, соединяющие между собой ЭБУ, и провода питания нагрузок/потребителей сводятся вместе на станках для скрутки жгутов. Так получаются жгуты проводов. Здесь необходимо соблюдать множество разных граничных условий:

- концепция изготовления (одно- или многосоставный жгут проводов);
- поперечные сечения (гибкость);
- электромагнитная совместимость (EMC);
- рассеяние тепла;
- масса;
- стоимость (например, меди);
- устройство автомобильного жгута проводов.

Структура описывает возможные пути прокладки проводов в кузове, например, структура H, состоящая из двух основных ветвей от передней до задней части автомобиля и перекрестной ветви, идущей с левой стороны автомобиля к правой.

На стадии разработки общей концепции автомобиля обычно достаточно двухмерных моделей; подробные трехмерные модели используются на более поздних стадиях проектирования.

Процесс разработки E/E-архитектуры

Процесс разработки E/E-архитектуры соединяет между собой отдельные стадии проектирования на логической и временной основе и обеспечивает критерии качества в начале и в конце стадии проектирования.

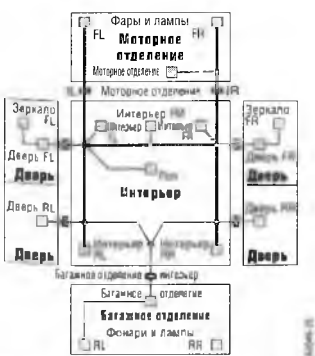
Поскольку E/E-архитектура для автомобилестроения – все еще молодая дисциплина, процессы у автопроизводителей и их поставщиков пока сильно разнятся. Это относится и к количеству, и последовательности стадий проектирования, и к критериям качества.

Управление требованиями

Требования решающим образом определяют действия E/E-архитектора. Рекомендуется различать функциональные и нефункциональные требования. Функциональные требования означают желаемые характеристики при эксплуатации автомобиля. Нефункциональные требования означают техническое решение и поэтому их также называют проектными ограничениями.

Таким ограничением может быть, например, свободное пространство в центральной консоли для установки ЭБУ. Другим ограничением может быть максимально допустимое рассеяние тепла в месте, которое влияет на размещенную там силовую электронику.

Рис. 9. Пример двухмерной пространственной модели:
RL – задний левый; RR – задний правый, FL – передний левый; FR – передний правый; FM – передний средний; IL – внутренний левый; IR – внутренний правый



Таким образом, например, аудиоусилители часто устанавливаются в багажниках, так как тепло в области панели приборов не может адекватно рассеиваться.

После подготовки документации по функциональным и нефункциональным требованиям начинается фактическая разработка E/E-архитектуры.

Разработка E/E-архитектуры

Разработка E/E-архитектуры может идти двумя путями: по принципу «снизу вверх», т.е. начиная с существующих компонентов, и по принципу «сверху вниз», т.е. с реализацией всех ранее описанных этапов моделирования, начиная с функциональных и нефункциональных требований.

Принцип «снизу вверх», во время создания E/E-архитектуры, начиная с функциональности существующих компонентов, предусматривает дополнение этих компонентов функционально-коммуникативными аспектами и прохождение соответствующих этапов моделирования. Этот подход обычно выбирается для создания E/E-архитектур последующих поколений существующих автомобильных платформ.

Принцип «сверху вниз» фокусируется на сложности функций и обычно выбирается для создания E/E-архитектур новых автомобильных платформ.

Использование E/E-концепций позволяет обмениваться данными с партнерами-разработчиками электронных компонентов и жгутов проводов.

Оценка моделей

Для всех методов необходимо соблюдать следующее: при переходе от одной модельной иерархии к следующей (например, от функциональной модели к технологической), список критериев оценки (например, повторное использование или тестируемость) сравнивается с набором конкретных решений (например, шинных технологий). Оценка конкретных решений по критериям позволяет решению принять форму на основе чисто функциональных требований и неизбежных граничных условий (критерий «MUST»). Эту процедуру также называют QFD (Развертывание функции качества).

Альтернативная процедура заключается в сравнении опорного решения (например, предыдущей модели организации сети) с альтернативными с помощью критериев оценки.

Она дает поистине быстрые результаты, но не абсолютный оптимум.

Поскольку критерии оценки всегда взвешиваются автопроизводителями по-разному, электронные системы автомобилей иногда значительно различаются.

Инструменты разработки E/E-архитектуры

Для моделирования архитектуры идеально подходит инструмент, который может соединить между собой различные модели и уровни моделей E/E-архитектуры. Таким образом, создается полностью соединенная документация. Это позволяет реализовывать различные дисциплины, являющиеся частью процесса разработки, в нужных точках. Кроме того, должна обеспечиваться возможность числовой регистрации свойств моделирования, чтобы можно было обеспечить оценку.

Между тем на рынке появились различные инструменты для разработки E/E-архитектуры, позволяющие выполнять моделирование архитектуры с помощью инструментов. Важным моментом является стандартизация моделей и их форматов данных. Только это обеспечивает конкуренцию между изготовителями инструментов и открывает различным дисциплинам возможности для присоединения к процессу в разных точках.

Для будущего плавного перехода к конфигурации системы и ЭБУ с помощью технологий AUTOSAR требуется инструмент разработки E/E-архитектуры для поддержки форматов обмена AUTOSAR, таких как «Описание системы» и «Описание компонентов программного обеспечения». Поэтому мы остановимся на стандарте AUTOSAR более подробно.

AUTOSAR

Партнерство AUTOSAR (открытая системная архитектура для автомобилестроения) было учреждено в июле 2003 года автопроизводителями и их поставщиками, среди которых числится и компания Bosch. Его главной целью является совместная разработка открытой программной архитектуры для автомобильных приложений будущего. Цели партнерства включают в себя стандартизацию фундаментальной инфраструктуры ЭБУ (базовое программное обеспечение), форматов обмена и функциональных интерфейсов. Они призваны заменить существовавшие в компаниях индивидуальные решения. Для того чтобы успевать за постоянным усложнением систем, в связи с появлением новых функций, используются концепции и методы на базе моделей. Требования к качеству и надежности выполняются путем использования проверенных стандартов.

На основе программного обеспечения со стандартизированной инфраструктурой, состоящей, главным образом, из стандартных модулей, каждый автопроизводитель может реализовать свой контент (прикладное программное обеспечение).

Цели и концепции

Стандарт AUTOSAR преследует следующие цели:

- повторное использование программного обеспечения для разных ЭБУ, автомобильных платформ и автопроизводителей;
- поддержка в интеграции программного обеспечения третьих лиц в области как базового, так и прикладного программного обеспечения;
- поддержка смещения прикладного программного обеспечения между ЭБУ (статичная);
- обмен стандартными аппаратными блоками (например, трансивер CAN) без изменений в прикладном программном обеспечении.

Программная архитектура, определяемая стандартом AUTOSAR (рис. 7), поддерживает четкое разделение между базовым и прикладным программным обеспечением. Это достигается несколькими абстракционными уровнями в базовом программном обеспечении – от драйверов устройств до сложных инфраструктурных сервисов и среды прогона (RTE) стандарта AUTOSAR.

Поскольку интерфейсы большинства модулей базового программного обеспечения в этих слоях стандартизированы, то стандартные аппаратные блоки и соответствующие драйверы можно заменить без изменения прикладного программного обеспечения.

И наоборот, прикладное программное обеспечение, ограничивающееся использованием этих стандартных интерфейсов, можно гораздо проще ввести в ЭБУ на стадии разработки и даже переместить в другой ЭБУ. Например, одно и то же прикладное программное обеспечение контроллера скорости автомобиля в зависимости от платформы автомобиля может работать на блоке управления двигателем, блоке управления трансмиссией или другом ЭБУ без изменения прикладного программного обеспечения. Для этого, естественно, требуется достаточно мощный ЭБУ и соответствующая организация сети.

Стандартизация базового программного обеспечения и возможность его конфигурации в зависимости от требований к прикладному программному обеспечению позволяет повторно использовать модули базового программного обеспечения для разных автомобильных платформ и автопроизводителей. Это повышает качество программного обеспечения, поскольку никаких изменений на уровне продукта не происходит, сокращает затраты на разработку путем повторного использования и образует устойчивую основу для постоянного роста сложности и объединения функций приложений.

Партнерство AUTOSAR также разрабатывает концепции на базе моделей для раннего утверждения проекта системы. На основе формализованного описания выполняется проверка соответствия интерфейсов прикладного программного обеспечения друг другу, при этом прикладное программное обеспечение не обязательно должно быть в виде полной программы.

Резюме и перспективы

С ростом количества и степени интеграции электронных систем необходимо использовать подходящие процессы, методы и инструменты при разработке E/E-архитектуры. Разработка E/E-архитектуры в автомобилестроении превратилась в независимую задачу и оказывает решающее влияние при разработке новых автомобилей. Если описанные здесь процедуры будут последовательно применяться и развиваться, то в будущем автомобильная электроника будет управляемой и продолжит вносить значительный вклад в улучшение потока перевозок, безопасности движения, повышение комфорта и экономичности.

Список литературы

[1] DIN EN 60617, Graphical symbols for diagrams.
[2] DIN 72552, Terminal markings for motor vehicles.
[3] AUTOSAR Release 3.1, Rev. 2.
[4] AUTOSAR Release 4.0: ASAM Fibex - Field Bus Exchange Format, Version 3.1.
[5] DIN 19226 Control technology.

Датчики

Базовые принципы

Функция

Преобразование физической величины Φ в электрическую количественную величину E.

Классификация

Назначение и применение:

– функциональное (разомкнутые и замкнутые цепи управления);
– безопасность и поддержка;
– контроль и получение информации.

Тип характеристической кривой (рис. 1):

– с непрерывной линейной: используется в контуре с широким диапозоном измерений;
– с непрерывной нелинейной: контроль какого-либо параметра в пределах узкого диапазона измерения в системах с обратной связью;
– с прерывистой многоуровневой: управление в случаях, когда требуется немедленное определение величины сигнала, если достигается его предельное значение;
– с дискретной двухуровневой (иногда с явлением гистерезиса): контроль поправки для прямого или последующего регулирования.

Тип выходного сигнала (рис. 2)

Выходной сигнал пропорционален:

– амплитуде, величине тока или напряжения;
– частоте или периоду;
– продолжительности импульса (коэффициенту заполнения импульсов).

Дискретный выходной сигнал:

– двухуровневый (двоичный);
– многоуровневый (неравномерная градуировка);
– многоуровневый (равномерный) или цифровой.

Рис. 1. По характеристике:
S – выходной сигнал; X – измеренная переменная, a – непрерывный, линейный; b – непрерывный, нелинейный, c – прерывистый, многоуровневый; d – прерывистый, двухуровневый с гистерезисом

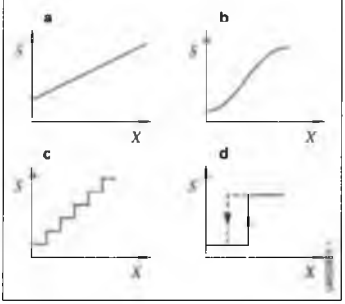


Рис. 2. Форма сигнала (примеры):
a – частота f; b – длительность импульса T_i; U – выходной сигнал; t – время

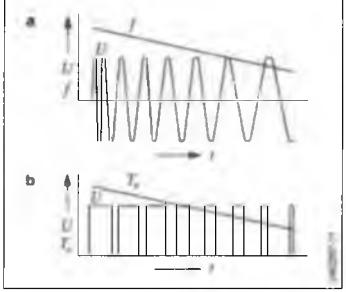
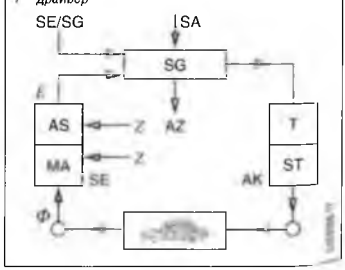


Рис. 3. Автомобильный датчик:
Φ – физическое количество; E – электрическое количество, Z – влияющее количество;
AK – исполнительный орган; AS – согласующая схема; AZ – дисплей; MA – измерительный датчик; SA – выключатель; SE – датчик; SG – блок управления (ЭБУ); ST – исполнительный орган; T – драйвер



Применение в автомобильной промышленности

Датчики и исполнительные механизмы представляют собой периферийные устройства линии связи между транспортным средством с его сложным приводом, тормозами, шасси и работой агрегатов общецелевого использования, включая навигационные устройства, и блоками управления, обрабатывающими получаемые сигналы. Переходные устройства (адаптеры) обычно используются для преобразования сигналов датчика в стандартную форму, необходимую для передачи на блок управления. Кроме того, на работу системы могут влиять сигналы датчиков из других обрабатывающих элементов и/или выключатели, которыми манипулирует водитель (рис. 3).

Основные требования

Степень нагрузки, которой подвергается датчик, определяется условиями эксплуатации (механические, климатические, химические, электромагнитные влияния).

По условиям эксплуатации и предъявляемым требованиям датчики транспортных средств делятся на три класса надежности, в зависимости от расположения:

- рулевое управление, тормоза, защита пассажира;
- двигатель, трансмиссия, подвеска, шины;
- комфорт, информация/диагностика, противоугонная защита.

Концепции миниатюризации устройств служат:

- технологии гибридных интегральных схем и подложек (датчики температуры и давления);
- полупроводниковые технологии (контроль частоты вращения, например, датчиком Холла);
- микромеханика (датчики измерения ускорения и давления);
- микропроцессорная технология (интеграция микромеханических или микрооптических компонентов с микроэлектронными схемами в сложную систему).

Встроенные датчики

Системы управления развиваются от локальных электронных схем обработки сигналов с гибридными и монолитными встроенными датчиками до комплексных цифровых схем с аналого-цифровыми преобразователями и микрокомпьютерами (мехатроника), полностью использующими прецизионные возможности датчика («интеллектуальные» датчики, рис. 4). Достоинства:

- уменьшение нагрузки на ЭБУ;
- унифицированный, гибкий, совместимый с шиной интерфейс;
- множественное применение датчиков;
- конструкции с несколькими датчиками;
- использование небольших измерительных эффектов и высокочастотных измерительных эффектов (локальное усиление и демодуляция);
- хранение индивидуальных коэффициентов коррекции в программируемой памяти PROM для улучшения характеристик и местной компенсации погрешностей датчика, а также общей балансировки работы датчика и цепи.

Рис. 4. Уровень интеграции датчиков:
SE - датчик; SA – обработка сигнала (аналоговая); AD - преобразователь цифрового сигнала в аналоговый; SG – ЭБУ (цифровой); MC – микрокомпьютер



Микромеханика

Области применения

Термин «микромеханика» обозначает применение полупроводниковой технологии в производстве механических компонентов из полупроводниковых материалов (главным образом, кремния). Здесь используются и полупроводниковые, и механические свойства кремния. Первые микромеханические кремниевые измерительные преобразователи давления были установлены на транспортных средствах 80-х годов. Исследования типичных механических параметров материалов распространились на микрометрический диапазон.

Механические свойства кремния (например, прочность, твердость и модуль Юнга, см. ниже в табл. 1) сопоставимы со сталью. Однако кремний значительно легче стали и обладает большей удельной теплопроводностью. Используются монокристаллические кремниевые пластины с почти идеальными механическими свойствами. Гистерезис и утечка по поверхности ничтожны. Ввиду хрупкости монокристального материала, на кривой зависимости деформации от напряжения отсутствует участок текучести; поэтому материал разрывается в тот момент, когда превышается предел упругой деформации.

Существуют два метода производства кремниевых микромеханических структур – объемная микромеханика (VMM) и поверхностная микромеханика (SMM). В обоих методах используются как стандартные процессы микроэлектроники (например, эпитаксиальное выращивание, окисление, диффузия и фотолитография), так и специальные ([1]).

Объемная микромеханика

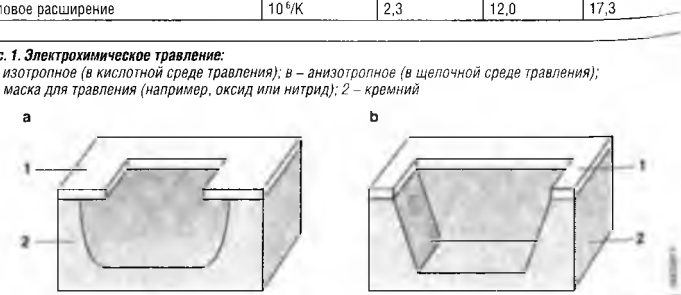
Материал кремниевой пластины обрабатывается на требуемой глубине с помощью анизотропического (щелочного) травления с электрохимической остановкой или без таковой. В задней части материал удаляется изнутри кремниевого слоя, где нет маски для травления наверху (рис. 1). С помощью этого метода можно создавать очень маленькие мембраны толщиной 5–50 мкм, а также отверстия, лучи и сетки, необходимые, например, в датчиках давления и ускорения.

Проблема при щелочном травлении состоит в том, что стенки идут внутрь под углом. Чтобы можно было осуществить высокоточное травление на глубине с вертикальными стенками, было необходимо разработать новый процесс. Здесь компания Bosch совершила прорыв своей разработкой процесса DRIE (глубокое реактивное ионное травление). Он предусматривает создание в специальном реакторе с газовой фазой чередующихся газов и сопутствующих усло-

Таблица 1. Механические свойства кремния

Параметр	Единица измерения	Кремний	Сталь (макс.)	Нержавеющая сталь
Растягивающая нагрузка	10^5 Н/см^2	7,0	4,2	2,1
Твердость по Кнупу (микротвердость)	кг/мм^2	850	1,500	660
Модуль упругости (модуль Юнга)	10^7 Н/см^2	1,9	2,1	2,0
Плотность	г/см^3	2,3	7,9	7,9
Теплопроводность	Вт/см К	1,57	0,97	0,33
Тепловое расширение	10^{-6}/К	2,3	12,0	17,3

Рис. 1. Электрохимическое травление:
а – изотропное (в кислотной среде травления); в – анизотропное (в щелочной среде травления);
1 – маска для травления (например, оксид или нитрид); 2 – кремний



вий для стадии травления и затем для стадии пассивации. Это травление и последующая пассивация стенок выполняются так, что получаются очень точные вертикальные стенки. Этот процесс можно использовать и для объемной, и для поверхностной микромеханики.

Поверхностная микромеханика

В поверхностной микромеханике, в отличие от объемной, в качестве основного материала используется только кремниевая пластина. Подвижные структуры формируются в поликристаллическом кремниевом слое, который создается на поверхности кремния посредством элитаксиального наращивания (процесс подобен тому, что применяется при изготовлении интегральных схем).

При изготовлении компонента поверхностной микромеханики на пластину сначала наносится расходуемый слой оксида кремния, который структурируется стандартными полупроводниковыми процессами, т.е. частично снова убирается (рис. 2, a). Затем в эпитаксиальном реакторе при высокой температуре накладывается слой поликристаллического кремния толщиной около 10 мкм (рис. 2, b), структура которого протравливается анизотропно, т.е. вертикально, с помощью лаковой маски (глубокое протравливание, рис. 2, c). Вертикальные боковые стенки образуются посредством чередования циклов травления и пассивации. Вытравленная боковая секция стенки во время пассивации полимером выступает в качестве защиты от воздействия при последующем травлении. Вертикальные стенки, создаваемые таким образом, имеют высокую точность исполнения. На последней стадии процесса (рис. 2, d) оксидный слой, располагаемый ниже поликремниевого слоя, удаляется с помощью газообразного фтористого водорода (рис. 3).

Помимо всего прочего, поверхностная микромеханика используется в производстве емкостных датчиков ускорения для подушек безопасности и датчиков вращения вокруг вертикальной оси для системы динамической стабилизации (ESP) и системы защиты при опрокидывании.

Рис. 2. Этапы процесса в поверхностной микромеханике:
a – нанесение и структурирование расходуемого слоя; b – нанесение поликристаллического кремния; c – структурирование поликристаллического кремния путем глубокого травления, d – удаление расходуемого слоя с получением свободно движущихся структур на поверхности; 1 – кремний, 2 – оксидный слой; 3 – слой поликристаллического кремния

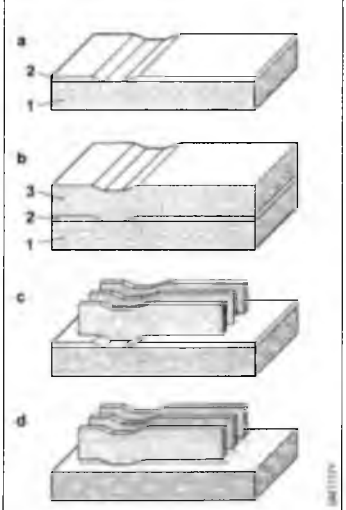


Рис. 3. Структура микромеханического поверхностного датчика
Запись с растрового электронного микроскопа: 1 – фиксированный электрод; 2 – зазор; 3 – пружинный электрод



Процесс APSM

В процессе APSM (улучшенная пористая кремниевая мембрана) используется совершенно иная поверхностно-микромеханическая технология. В нем используются свойства пористого кремния создавать под монокристаллической мембраной точно определенную полость с вакуумом.

Основой процесса APSM является пористый кремний. Его можно изготавливать выборочно и на локально ограниченной основе из p-легированного кремния с помощью электромеханического анодирования во фтористоводородной кислоте. При этом часть кремния растворяется, оставляя в кристалле пористую, губчатую кремниевую раковину, «пористый кремний».

В свою очередь, пористый кремний может при высокой температуре трансформироваться. Кремниевая раковина растворяется, при подходящих условиях образуя на поверхности тонкую мембрану. Под этой мембраной образуется полость (рис. 4). Толщину этой тонкой мембраны можно увеличить до нужной величины посредством эпитаксиального выращивания.

Монокристаллический эпитаксиальный слой используется, к примеру, в качестве диафрагмы датчика давления. Элементы оценивающего контура в эпитаксиальном слое за пределами диафрагмы позволяют создать высокоточный, небольшой и недорогой датчик давления.

Современные датчики давления, например, барометрические датчики для систем управления двигателем, изготавливаются с помощью технологии APSM.

Присоединение пластины

Другой важной задачей при производстве микромеханических систем, кроме получения кремниевых структур, является соединение двух пластин. Такое соединение требуется, например, для герметичного уплотнения полостей (в частности, для применения контрольного вакуума в датчике давления), для защиты чувствительных структур с помощью уплотнений (в датчиках ускорения и частоты вращения, рис. 5), для соединения кремниевой пластины с промежуточными слоями, которые минимизируют тепловые и механические напряжения (например, стеклянное основание на датчиках давления).

При анодировании с кремниевой пластиной соединяется пластина из пирекс-стекла при электрическом напряжении порядка 100 В и температуре около 400 °C (рис. 6). Сильное электростатическое притяжение и электрохимическая реакция (анодное окисление) в результате обеспечивают постоянную герметичную связь между стеклом и кремнием.

При соединении стеклоуплотнением две кремниевые пластины контактируют между собой посредством слоя стеклянного припоя (применяемого при трафаретной печати) при температуре около 400 °C с одновременным приложением давления. Стеклянный припой расплавляется, образуя герметичное соединение с кремнием.

Литература

[1] U. Hilleringmann: Mikrosystemtechnik – Prozessschritte, Technologien, Anwendungen. B.G. Teubner-Verlag, Wiesbaden 2006.

Рис. 4. Создание точных вакуумных полостей в кремнии по технологии APSM:
1 – кремний; 2 – полость, созданная из пористого кремния по технологии APSM; 3 – мембрана; 4 – оценивающий контур

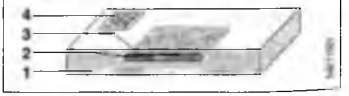


Рис. 5. Тонкослойный колпачок для герметизации датчика, например, датчика ускорения:
1 – кремний; 2 – свободно движущаяся структура; 3 – колпачок



Рис. 6. Присоединение анодной пластины:
1 – пирекс; 2 – кремний; 3 – нагревательная пластина (T = 400 °C)



Датчики положения

Датчики положения регистрируют перемещение в одном или нескольких направлениях и угловые положения (поступательное и вращательное движения) самых разнообразных типов и диапазонов – одним словом, все, что можно измерить в метрах и градусах. Сюда, например, относятся: зазоры, расстояния, перемещения, уровни заполнения и даже незначительные удлинения.

В этой области применения специалисты давно стремились перейти к датчикам ближней локации и бесконтактным датчикам. Такие датчики не подвержены износу и поэтому имеют длительный срок службы и более надежны. Хотя необходимость экономить часто вынуждает автопроизводителей сохранять «щеточный» принцип датчиков, и такие датчики работают все еще достаточно эффективно во многих областях.

Измеряемые переменные (примеры)

Непосредственно измеряемые переменные:

- положение дроссельной заслонки;
- положения педали управления подачей топлива;
- положения сидений и зеркал заднего вида;
- ход и положение тяги механизма управления;
- уровень топлива;
- ход сервоблока муфты сцепления;
- положение педали тормоза;
- угол поворота рулевого колеса;
- угол наклона;
- дальние расстояния: автомобиль – автомобиль или автомобиль – препятствие;
- короткие расстояния;
- курс.

Косвенно измеряемые переменные:

- угол отклонения пластины датчика (расход);
- перемещение подпружиненной массы (ускорение);
- перемещение диафрагмы (давление);
- статический прогиб подвески (регулировка фар);
- угол закручивания торсиона (момент);
- отклонение пружины (масса переднего пассажира).

На практике инкрементные датчики часто также называют датчиками углового положения, даже когда они используются для измерения скорости вращения. В действительности же они не являются датчиками углового положения. Поскольку приращение (шаг увеличения параметра), измеряемое этими датчиками для определения угла отклонения, сначала должно подсчитываться с правильным знаком (т.е. складываться), существует возможность постоянных ломех

Потенциометры со скользящими (подвижными) контактами

Щеточный потенциометр измеряет линейные и угловые перемещения благодаря пропорциональной связи между длиной проволоки или дорожки и ее электрическим сопротивлением (рис. 1). В настоящее время это самый дешевый датчик линейного/углового перемещения.

Напряжение обычно подается на измерительную дорожку через последовательные резисторы малого сопротивления R_V (их также можно использовать для калибровки нулевой точки и крутизны кривой). Форма контура по всей ширине измерительной дорожки (включая форму отдельных секций) влияет на форму характеристической кривой.

Стандартное подключение подвижного контакта выполняется с помощью второй контактной дорожки, состоящей из того же материала, нанесенного на проводящую подложку. Во избежание износа и погрешности измерения ток в зоне контакта минимизи-

Рис. 1. Потенциометр со скользящим контактом: *1 – скользящий контакт; 2 – дорожка потенциометра; 3 – контактная дорожка; U_0 – подаваемое напряжение; U_A – измеряемое напряжение; R – сопротивление; α – угол поворота скользящего контакта*



руют (I_A < 1 мА), а устройство в целом защищается от пыли.

Примеры применения:
- датчик углового положения дроссельной заслонки (M-Motronic);
- датчик углового положения дроссельной заслонки в дросселе (ME- и DI-Motronic);
- датчик положения педали газа;
- датчик уровня топлива.

Магнитно-индуктивные датчики

Из всех датчиков, выполняющих бесконтактное измерение положения, магнитные датчики особенно нечувствительны к помехам и надежны. Это особенно относится к датчикам, зависящим от переменного тока, т.е. магнитно-индуктивным датчикам. По сравнению с микромеханическим датчиком, для необходимой здесь конфигурации катушки требуется гораздо больше места. Поэтому возможностей для резервной конструкции (параллельного измерения) здесь нет. Кроме того, катушечное контактирование менее благоприятно с экономической точки зрения и с точки зрения надежности.

Из множества прижившихся принципов этого типа компания Bosch использовала в автомобилях прежде всего два (электроиндуктивные датчики и короткозамыкающие кольцевые датчики), очень похожие по принципу работы. Однако для новых разработок Bosch больше не использует макромеханические версии автомобильных датчиков. Вместо этого в Bosch обратились к очень экономичной модели компании Hella, принцип действия которой похож на индуктосин.

Датчики с закорачивающим кольцом

В отличие от электроиндуктивных датчиков, катушка датчика с закорачивающим кольцом имеет прямой или изогнутый U- или E-образный магнитомягкий, (обычно) пластинчатый железный сердечник (рис. 2). Движущееся «закорачивающее кольцо» изготавливается из материала с высокой проводимостью – меди или алюминия, расположено вокруг одной или всех секций сердечника. Из-за железного сердечника индуктивность таких датчиков гораздо выше, чем у не содержащих железа электроиндуктивных датчиков, а из-за очень концентрированного наведения магнитного потока железным сердечником – гораздо больший диапазон измерения. С типичным значением L_{max}/L_{min} = 4 диапазон измерения относительно высок. Это означает, что эти датчики хорошо работают на низких частотах, и им не обязательно требуется локально размещаемая сигнальная электроника, т.е. непосредственно на самом датчике. Железный сердечник также хорошо защищает измерительное пространство между секциями сердечника от внешних паразитных полей.

Переменное поле, создаваемое внутри и вокруг железного сердечника током катушки *I*, не способно пройти через закорачивающее кольцо, так как электроиндуктивные токи в кольце уменьшают его практически до нуля. Поэтому электроиндуктивные токи в закорачивающем кольце ограничивают – как «магнитный изолятор» – расширение магнитного потока Φ в пространство между катушкой и кольцом, делая его зависимым от положения x закорачивающего кольца ($\Phi = \Phi(x)$).

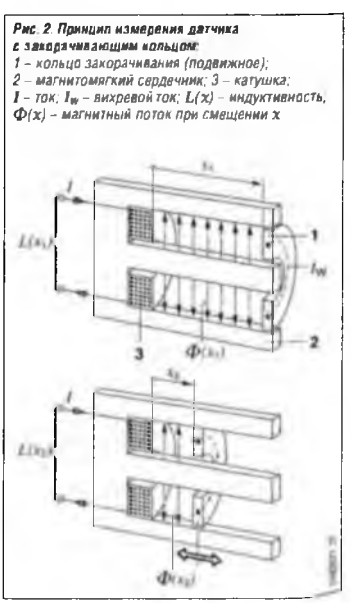


Рис. 2. Принцип измерения датчика с закорачивающим кольцом:
1 – кольцо закорачивания (подвижное); 2 – магнитомягкий сердечник; 3 – катушка; I – ток; I_W – вихревой ток; L(x) – индуктивность, $\Phi(x)$ – магнитный поток при смещении x

Индуктивность определяется по формуле:

(1) $L = \Phi(x)/I$.

Таким образом, положение x закорачивающего кольца также непосредственно влияет на индуктивность L катушки. Зависимость $L = L(x)$ оптимально линейна в широком диапазоне. Поскольку движущаяся масса относительно мала, для целей измерения можно использовать почти всю длину датчика. Механически близкое наведение закорачивающего кольца здесь не требуется.

Масса движущегося закорачивающего кольца очень мала. Величина зазора между катушкой и сердечником влияет на форму кривой: уменьшение зазора в сторону предела диапазона измерений еще больше улучшает уже хорошую линейность. В зависимости от материала и формы рабочий диапазон лежит в интервале 5-50 кГц. Этот датчик можно также использовать в очень жестких условиях, например, на ТНВД.

Из-за работы с переменным током сердечники ламинируются (например, производится ламинирование NiFe толщиной 0,2 мм). Для обеспечения необходимого механического соединения пластин (устойчивость к ускорению) они не просто традиционным образом склеиваются, но и дополнительно «упаковываются». Для этого на пластинах в определенных точках делаются кнопкообразные наплавки, которыми их можно соединить с внутренней стороны перед мягким отжигом (как в конструкторе LEGO) без значительного нарушения необходимой электрической изоляции от пластины к пластине.

Рис. 3. Схема и принцип работы полудифференциального датчика с закорачивающим кольцом: *1 – опорное закорачивающее кольцо (фиксированное), 2 – измерительное закорачивающее кольцо (подвижное), SA – обработка сигнала, SG – блок управления (ЭБУ), AD – преобразователь аналоговых сигналов в цифровые*



Полудифференциальные датчики с закорачивающим кольцом

Полудифференциальные датчики с движущимся измерительным и фиксированным опорным закорачивающими кольцами (рис. 3) отвечают требованиям к высокой точности. С их помощью проводятся измерения, которые действуют подобно:

- индуктивным делителям напряжения (обработка данных типа L_1/L_2 или $(L_1 - L_2)/(L_1 + L_2)$);
- либо элементам-определителям частоты в генераторной схеме, создающим сигнал, пропорциональный частоте (хорошие характеристики помехозащищенности, простое цифровое преобразование).

Области применения:

- датчики положения золотника для ТНВД;
- датчики углового положения в исполнительных механизмах подачи топлива в насосах распределенного впрыска дизельного топлива.

Датчики с вращающимися переменными полями

Двух- или многополюсные структуры с переменными полями могут быть организованы в круге или линейно с катушками, на которые подается переменный ток угловой частоты ω, или катушкообразными конфигурациями (такими как меандровые структуры с токоведущими дорожками). По сравнению с обычно фиксированным набором приемных катушек с одинаковым полюсным делением эти полюсные структуры с фиксированным полюсным делением могут смещаться движением измеряемой системы – будь то вращательное или поступательное движение. Здесь амплитуды сигналов приемника U_1, U_2, U_3,... изменяются синусоидально с движением. Если приемные катушки смещаются относительно друг друга на определенную часть полюсного деления T (например, $T/4$ или $T/3$), синусоидальная форма сдвигается в каждом случае на соответствующий угол (например, на 90° или 120°). После выпрямления измеряемый угол поворота φ можно вычислить с высокой точностью на основании этих напряжений. Этот режим работы датчиков в классической метрологии называют синхронизацией, синусно-косинусным преобразованием или индуктосином, и предпочтительно эти датчики используются, как датчики углового положения.

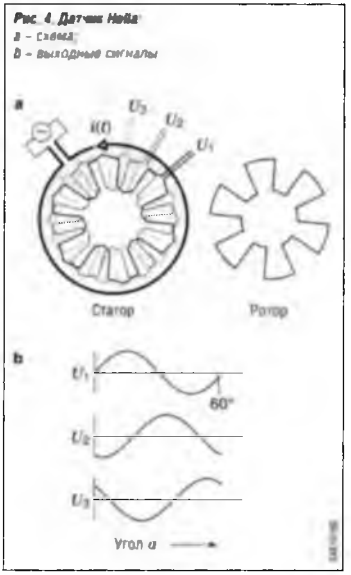


Рис. 4. Датчик Hella
a – схема;
b – выходные сигналы

Датчик Hella

Датчик углового положения, разработанный компанией Hella, больше всего напоминает индуктосин. На рис. 4 для примера показан датчик с шестиполюсной структурой (n = 6), что в электрическом выражении преобразует угол вращения $\varphi = 60°$ в фазовое смещение амплитуд сигнала на угол $\alpha = 360°$. Все необходимые структуры с токоведущими дорожками, по крайней мере, в случае с фиксированной частью (статором), расположены на многослойной плате. Роторная часть, при необходимости, тоже может быть выполнена по технологии тиснения либо в самонесущем исполнении, либо на пластмассовых опорах (горячее тиснение).

На статоре размещается круговой контур с токоведущими дорожками, который, независимо от угла поворота, индуцирует при рабочей частоте 20 МГц вихревой ток в автономном меандровом контуре с примерно таким же внешним диаметром на роторе. Как и контур возбуждения, этот вихревой ток создает вторичное магнитное поле, перекрывающее поле возбуждения настолько, что пытается погасить его. Если бы на роторе вместо меандра была только круговая токоведущая дорожка, конгруэнтная контуру статора, это просто максимально заглушило бы первичное поле. Однако меандровая структура создает результирующее многополюсное поле, которое может вращаться с ротором, и суммарный магнитный поток которого, естественно, тоже практически равен нулю.

Это многополюсное переменное поле считывается концентрическими приемными катушками или меандрами идентичной формы, также находящимися на статоре. Эти катушки или меандры смещаются в пределах полюсного деления (например 60°) в каждом случае на 1/3, т.е. электрически в амплитуде сигнала на 120° (рис. 4). Однако приемные катушки распределяются по всем n парам полюсов (последовательное соединение), используя все полюсные поля сразу.

На рис. 5 показаны приемные катушки, соединенные звездой. Для определения электрического фазового угла α или механического угла поворота φ сигналы катушек проходят к специализированной интегральной схеме (ASIC), выполняющей необходимые выпрям-

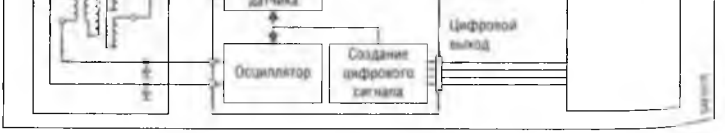


Рис. 5. Датчик Hella с интерфейсом μC

ление, отбор и формирование соотношения. Один ее вариант – ASIC 1 – принимает необходимые цифровые управляющие сигналы от расположенного рядом микроконтроллера. Но и другой ее вариант – ASIC 2 – тоже может управлять датчиком совершенно независимо (автономно). Интегральные схемы ASIC также позволяют регулировать механические и электрические допуски в производстве, на конечной стадии.

Для областей применения с повышенными требованиями к безопасности можно также создать дублированную систему – с двумя изолированными путями прохождения сигнала и двумя ASIC. Датчик может принимать и «открытую» форму, как датчик хода. Таким образом, датчик можно использовать во многих узлах автомобиля (например, для измерения угла открытия дроссельной заслонки, положения рычага автоматической коробки передач, положения фар в системе регулировки фар).

Магнитостатические датчики

Магнитостатические датчики измеряют постоянное магнитное поле. В отличие от магнитно-индуктивных (катушечных) датчиков, они гораздо лучше подходят для миниатюризации и могут изготавливаться при разумных затратах по микросистемным технологиям. Поскольку постоянное магнитное поле может легко проникнуть через пластмассовые и неферромагнитные металлические стенки корпусов, преимущество магнитостатических датчиков состоит в том, что чувствительную, обычно фиксированную часть можно хорошо закапсулировать и защитить от вращающейся части – обычно это постоянный магнит или магнитомягкий проводящий элемент – и от окружающей среды. Прежде всего используются гальванометрические эффекты (эффекты Холла и Гаусса, рис. 6), а также анизотропические магниторезистивные (AMR) металлические тонкопленочные элементы.

Гальваномагнитный эффект

В таких датчиках используются прежде всего тонкие полупроводниковые пластинки для оценки эффекта Холла. Если через такую токонесущую пластинку перпендикулярно к ее плоскости проникнет магнитная индукция B, то носители заряда будут отклонены силой Лоренца, действующей поперечно к полю и току I, на угол α от их прямого пути. Таким образом, возможен отбор напряжения U_H, пропорционального полю B и току I поперечно направлению тока между двумя противоположными точками пластинки (эффект Холла):

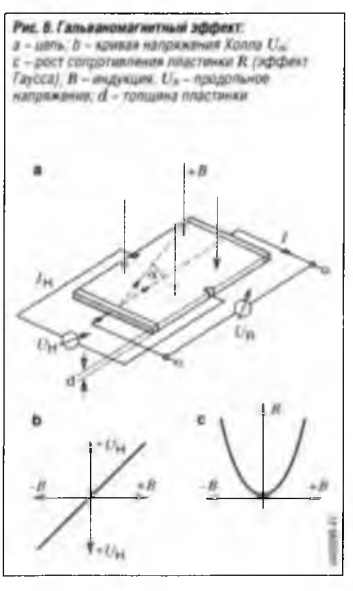
$U_H = R_H \cdot I\,B/d$, где

R_H – коэффициент Холла;

d – толщина пластинки.

В то же время последовательное сопротивление пластинки увеличивается независимо от направления поля, согласно примерно параболической кривой (эффект Гаусса, магниторезистивный эффект). Коэффициент R_H, важнейший для измерительной чувствительности пластинки, в случае с кремнием сравнительно мал; но поскольку толщину пластинки d можно сделать крайне малой с помощью технологий диффузии, то напряжение Холла U_H снова принимает технически приемлемое значение. Когда в качестве основного материала используется кремний, в пластинку можно встроить контур кондиционирования сигнала, поэтому датчики, использующие эти принципы очень дешевы в изготовлении.

Рис. 6. Гальваномагнитный эффект:
a – цепь; b – кривая напряжения Холла U_H; c – рост сопротивления пластинки R (эффект Гаусса); B – индукция; U_R – продольное напряжение; d – толщина пластинки



Однако в плане чувствительности измерений, температурного коэффициента и диапазона температур кремний – далеко не лучший полупроводниковый материал для датчиков Холла. Полупроводники «III-V», такие как арсенид галлия или антимонид индия, имеют гораздо лучшие свойства.

Типы датчиков Холла

Переключатель на датчике Холла

В самом простом случае напряжение Холла подается на электронную пороговую схему, встроенную в датчик (триггер Шмитта), которая затем выдает цифровой сигнал. Если воздействующая на датчик магнитная индукция B ниже минимального порогового уровня, то выходное значение триггера Шмитта соответствует логическому нулю (состояние разблокировки); если оно превышает максимальный пороговый уровень, то выходное значение триггера Шмитта соответствует логической единице (состояние работы). Поскольку это поведение гарантируется во всем диапазоне рабочих температур и для всех датчиков данного типа, то два этих пороговых значения находятся относительно далеко друг от друга (около 50 мТл). Иными словами, для срабатывания переключателя на датчике Холла требуется значительный скачок индукции (ΔB). Такие датчики Холла, изготавливаемые, большей частью, по биполярной технологии, на самом деле очень экономичны, но больше подходят для переключающей работы (например, переключатели Холла для срабатывания зажигания в ранних системах зажигания, цифровые датчики угла поворота, рис. 7). Данные переключатели Холла слишком неточны для регистрации аналоговых переменных.

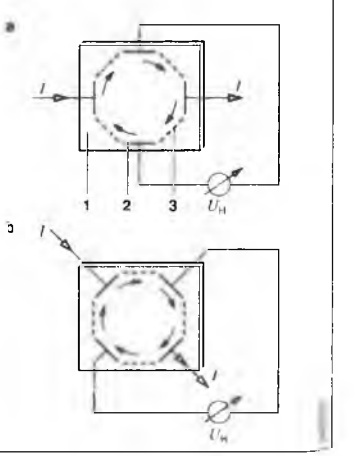
Рис. 7. Цифровой датчик Холла для измерения угла поворота до 360° с круговым равноудаленным расположением переключателей Холла:
1 – крышка с постоянными магнитами;
2 – кодирующий диск (магнитномягкий материал);
3 – печатная плата с переключателями Холла



Датчики Холла, использующие принцип вращающихся токов

Недостатком простого кремниевого датчика Холла является его одновременная чувствительность к механическим нагрузкам (пьезоэлектрический эффект), неизбежно возникающим из-за принятой компоновки и приводящим к неблагоприятному смещению температурного коэффициента. Этот недостаток удалось преодолеть путем применения принципа вращающихся токов (рис. 8) в сочетании с переходом к технологии CMOS. Пьезоэлектрический эффект здесь тоже возникает, но компенсируется осреднением сигнала по времени, поскольку он происходит в случае очень быстрого, электронно управляемого переключения (ротации) электродов с другим знаком полярности. Если цель – избежать затрат на сложную электронику для переключения электродов, можно также

Рис. 8. Датчик Холла, работающий по принципу вращающих токов:
a – фаза поворота φ_1,
b – фаза поворота;
$\varphi_2 = \varphi_1 + 45°$; 1 – кристалл полупроводника;
2 – активный электрод, 3 – пассивный электрод;
I – ток питания; U_H – напряжение Холла



встроить в непосредственной близости несколько датчиков Холла (2, 4 или 8) с соответственно разным расположением путей прохождения тока, и сложить их сигналы для получения среднего значения. Только такими путями удалось неплохо приспособить интегральную схему Холла к системам аналоговых датчиков. Эти меры лишь привели к уменьшению порой значительного влияния температуры на чувствительность измерения.

Такие интегральные схемы Холла прежде всего подходят для измерения небольших расстояний, при которых они регистрируют колеблющуюся напряженность поля постоянного магнита по мере приближения (рис. 9) (например, датчик iBolt для измерения массы переднего пассажира). До той поры столь же хорошие результаты можно было получить только путем использования отдельных элементов Холла из, например, полупроводников III-V (например, GaAs) с расположенным за ними гибридным усилителем.

Дифференциальные датчики Холла

В случае с двойным датчиком Холла (схемы с дифференциальными датчиками Холла, рис. 10), организуются две полные системы Холла на определенном расстоянии на одной пластинке. Соответствующая электронная цепь оценивает разность двух напряжений Холла. Преимущество таких датчиков состоит в том, что их выходной сигнал большей частью зависит от абсолютного значения напряженности магнитного поля, и как дифференциальные датчики они лишь регистрируют изменение магнитной индукции в пространстве, другими словами, градиент поля (отсюда распространенное название – «градиентный датчик»).

Поскольку полярность их выходного сигнала не зависит от воздушного зазора между ротором и датчиком, эти датчики в основном используются для измерения скорости вращения. Если для сканирования шестерни используется только один датчик Холла, он не сможет различить, из-за чего изменился маг-

Рис. 9 Измерение небольших смещений x датчика Холла:
Датчик Холла находится в плоскости y-z и измеряет только компонент поля H_x постоянного магнита линии A-A:
a – кривая напряженности поля на линии A-A;
b – организация измерения; 1 – диапазон измерения, 2 – направление смещения, 3 – датчик Холла, 4 – постоянный магнит, 5 – проводящий элемент

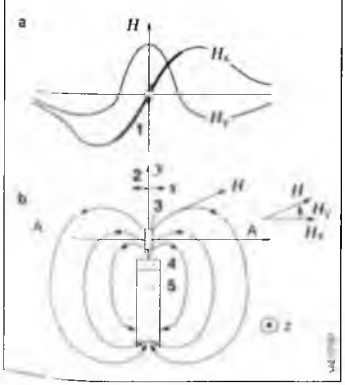
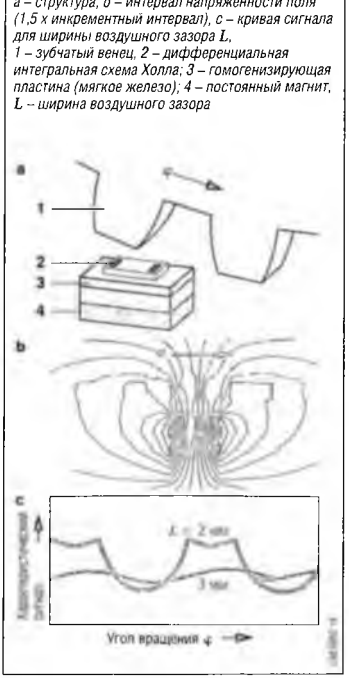


Рис. 10 Дифференциальный датчик Холла:
a – структура; b – интервал напряженности поля (1,5 x инкрементный интервал), c – кривая сигнала для ширины воздушного зазора L,
1 – зубчатый венец, 2 – дифференциальная интегральная схема Холла; 3 – гомогенизирующая пластина (мягкое железо); 4 – постоянный магнит, L – ширина воздушного зазора



нитный поток – из-за дальнейшего вращения шестерни или изменения расстояния (вибрации, монтажные допуски и пр.). Это вызывает значительные погрешности сканирования, поскольку сигнал должен подаваться на двухпороговый детектор. В случае с дифференциальными датчиками ситуация в корне отличается. Здесь оценивается только разность сигналов двух датчиков Холла, расположенных на приемлемом расстоянии друг от друга по окружности.

Если разность сигналов положительная, например, расстояние между шестерней и датчиком можно менять произвольно. Расстояние останется положительным, и сумма уменьшится. Знак полярности может измениться только при дальнейшем вращении ротора. Поэтому двухпороговый детектор без проблем различит изменение в расстоянии и вращении.

Чтобы добиться как можно более сильного выходного сигнала, два датчика Холла обычно располагаются на краю пластинки (вытянутой) – расстояние между ними соответствует примерно половине промежутка между приращениями (половине межзубного промежутка ротора). Максимум сигнала очень широк и охватывает широкий диапазон изменения промежутка между приращениями. Более выраженные изменения промежутка между приращениями требуют очень сложной реконструкции датчика.

Градиентный датчик должен быть точно совмещен с направлением вращения ротора.

Датчики Холла для измерения угла поворота на угол до 180°

С помощью поворотного магнитного кольца («подвижного магнита»), вместе с несколькими фиксированными магнито-мягкими токопроводящими элементами, можно генерировать выходной сигнал для более широкого углового диапазона без необходимости в преобразовании (рис 11). Здесь биполярное поле подвижного магнита направляется через датчик Холла, расположенный между полукруглыми токопроводящими элементами. Эффективный магнитный поток через датчик Холла зависит от угла поворота φ.

Датчик угла поворота типа ARS1 с диапазоном измерения около 90° (рис. 12) использует базовый принцип «подвижного магнита». Магнитный поток из практически полукруглого диска постоянного магнита возвращается в магнит через полюсный башмак, два дополнительных токопроводящих элемента, каждый из которых в своей линии магнитной индукции содержит датчик Холла, и вал, тоже ферромагнитный. В зависимости от угловой настройки магнитный поток в

Рис. 11. Датчик углового положения, работающий по принципу подвижного магнита:
a – положение a; b – положение b; c – выходной сигнал; 1 – ярмо магнита; 2 – статор (мягкое железо), 3 – ротор (постоянный магнит); 4 – воздушный зазор, 5 – датчик Холла; φ – угол поворота

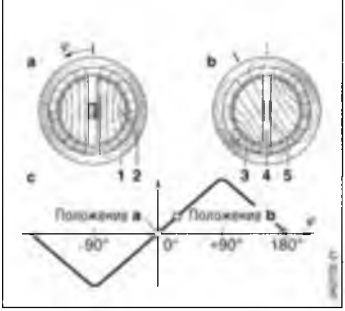
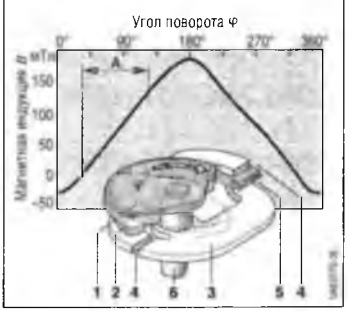


Рис. 12. Датчик Холла ARS1 для измерения угла поворота (подвижный магнит) с линейной характеристической кривой до 90°:
a – схема; b – характеристическая кривая с рабочим диапазоном A; 1 – роторный диск (постоянный магнит); 2 – полюсный башмак; 3 – проводящий элемент; 4 – воздушный зазор; 5 – датчик Холла; 6 – вал (магнитно-мягкий)



большей или меньшей степени проходит через два токопродящих элемента, в линии магнитной индукции которых также имеется датчик Холла. Используя этот принцип, можно добиться практически линейной кривой.

Тип ARS2 – это упрощенный вариант, обходящийся без токопродящих элементов (рис. 13). Здесь магнит движется вокруг датчика Холла по дуге окружности. Лишь относительно небольшая часть получающейся синусоидальной кривой отличается хорошей линейностью. Если датчик Холла расположен немного вне центра дуги окружности, то кривая будет больше отличаться от синусоиды, и тогда мы имеем узкий диапазон измерения – почти 90° и более широкий диапазон – более 180° – при хорошей линейности. Хотя большим недостатком является низкий уровень экранирования от внешних полей, а также оставшаяся зависимость от геометрических допусков магнитного контура и колебаний интенсивности магнитного потока в постоянном магните в зависимости от температуры и времени.

Датчики Холла для измерения угла поворота на угол до 360°

На рис. 14 показан аналоговый датчик Холла для измерения угла поворота до 360°. Как видно из рисунка, постоянный магнит вращается перед двумя датчиками Холла, расположенными под прямым углом друг к другу. Концепция измерения лишь незначительно ограничена до такой степени, чтобы датчик можно было установить на конце вращающегося вала. Магнит должен быть достаточно большим, чтобы не слишком зависеть от допуска на позиционирование магнита. Два датчика Холла, при максимально близкой сборке, следует располагать в направленно однородной части поля рассеяния постоянного магнита, которая также представляет угловое положение φ постоянного магнита. Датчики располагаются под прямым углом друг к другу и параллельно оси вращения постоянного магнита таким образом, чтобы они в каждом случае регистрировали компоненты x и y вектора напряженности поля B, вращаемого ими:

$$U_{H1} = U_x = B \cdot \sin \varphi ;$$

$$U_{H2} = U_y = B \cdot \cos \varphi .$$

Рис. 13. Датчик Холла ARS2 для измерения угла поворота (подвижный магнит) с линейной характеристической кривой до 180°:
a – принцип (интегральная схема Холла на этой иллюстрации смещена из центральной точки); b – характеристическая кривая, 1 – интегральная схема Холла расположена в центральной точке круговой траектории; 2 – интегральная схема Холла расположена вне центральной точки (линеаризация); 3 – магнит

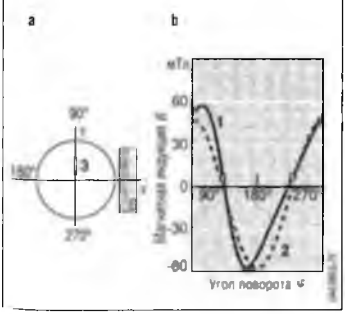


Рис. 14. Аналоговый датчик Холла для измерения угла поворота в пределах до 360°:
a – на основе дискретных интегральных схем; b – на основе планарно-интегрированных интегральных схем (устройств VHD), 1 – электронная схема преобразования сигнала; 2 – распределительный вал; 3 – управляющий магнит; B – магнитная индукция; I – ток; U – напряжение; U_A – выходное напряжение, φ – угол поворота

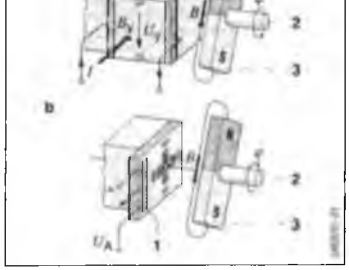
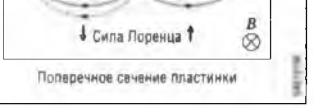


Рис. 15. Вертикальное устройство Холла (VHD), вид в разрезе
Токи, направленные в пластинку, отклоняются силами Лоренца за счет магнитной индукции B, направленной параллельно поверхности пластинки таким образом, что напряжение Холла U_H может быть определено между поверхностными электродами A и A'



Применяя тригонометрическую зависимость $\varphi = \arctan(U_{H1}/U_{H2})$, затем можно легко использовать эти сигналы для вычисления угла φ в имеющейся в свободной продаже оценочной пластинке, являющейся частью датчика. Здесь сигнал датчика обычно оцифровывается.

При таком расположении датчика Холла его в принципе можно также вертикально встроить таким образом, чтобы плоскость пластинки датчика была перпендикулярна оси вращения, а датчик, в отличие от обычного, плоского датчика Холла, демонстрировал чувствительность «в одной плоскости» (рис. 15). Монолитная интеграция гарантирует высокую степень точности необходимого расположения под прямым углом и необходимую компактность конструкции двух систем Холла.
Датчики углового положения этого типа рассматривались, например, для реализации бесстартерных систем непосредственного пуска, где нужно было измерять абсолютное положение распределительного вала в диапазоне 360°.

Однако для придания обычному плоскому датчику Холла дополнительной чувствительности «в одной плоскости» можно применять еще одно средство. В методе, используемом Мелексис-Сентроном (например, тип 2SA-10), на одной пластинке в узком кругу устанавливается в общей сложности четыре датчика Холла под углом 90° друг к другу для измерения компонентов поля B_x и B_y, возникающих в плоскости. Здесь каждый датчик, строго говоря, опять же состоит из пары элементов Холла, повернутых на 90° по упомянутым выше причинам. После изготовления полупроводниковой пластинки на нее монтируется круглая пластинка из магнитомягкого материала диаметром около 200 мкм таким образом, чтобы в положении упора датчики Холла оказывались точно под краем пластинки (рис. 16).

Из-за своей высокой относительной магнитной проницаемости эта пластинка выполняет функцию концентратора потока и заставляет все линии поля входить в ее поверхность вертикально. В результате линии поля, идущие горизонтально (в плоскости) без концентратора потока вынуждены в точке нахождения датчиков Холла изменить направление на вертикальное (вне плоскости) и таким образом могут управлять элементами Холла. Поскольку диагонально противоположные элементы могут «видеть» противоположные направления полей, в каждом случае оценивается разность между двумя противоположными одинаковыми напряжениями Холла для регистрации компонента

Рис. 16. Набор из 4 × 2 плоских датчиков Холла со встроенным магнитным концентратором (IMC)
Элементы Холла располагаются на пластинке парами под углом 90° друг к другу прямо под краем малой ферромагнитной пластины. Таким образом, плотность потока (индукция) $B_{\parallel}$ параллельная поверхности пластинки, вертикально преобразуется в плотность потока $B_{\perp}$, определяемую датчиками Холла:
1 – ферромагнитная пластина; 2 – пластинка CMOS; 3 – датчик Холла



поля. В то же время устраняется влияние любых существующих вертикальных компонентов B_2.

Это также возможно путем оценки суммарных сигналов диагонально противоположных элементов для регистрации вертикального компонента поля B_2, так как на это ничуть не влияет ферромагнитная пластина, и элементы не теряют свою обычную «вневплоскостную» чувствительность из-за его расположения. Поэтому при таком расположении можно зарегистрировать вектор индукции, действующий в месте нахождения датчика во всех трех компонентах. В одну пластинку с датчиком можно без значительных затрат встроить электронное устройство, необходимое для оценки сигнала, включая процессор цифровых сигналов на базе μC для вычисления арктангенса, и устройство для конечной регулировки датчика (EEPROM).

Для измерения углов до 360° достаточно поворачивать над пластинкой датчика со встроенной оценкой сигнала, как показано на рис. 17, желательно круглый, намагниченный постоянный магнит, расположенный параллельно пластинке. Поскольку угол поворота образуется с помощью функции арктангенса из соотношения двух синусоидальных и косинусоидальных сигналов датчиков, то напряженность магнитного поля, т.е. также старение магнита, его температурная зависимость и расстояние до поверхности датчика не играют никакой роли; определяется лишь направление вращения его намагничивания.

Максимальное внутреннее отклонение датчика определяется изготовителем в диапазоне 360° при +2°. Однако пользователь может значительно улучшить его при калибровке датчика. Точность цифрового вывода тогда составит 10 бит с разрешением 12 бит. Поскольку обработка сигнала процессором занимает определенное время, минимальный период амплитудно-импульсной модуляции для частоты синхронизации 20 МГц составит 200 мкс. Выходом сигнала широтно-импульсной модуляции можно управлять при максимум 1 кГц. Для инициализации датчика требуется 15 мс. Типичное значение для напряженности поля при измерении примерно равно 40 мТл. Чип концентратора принимает насыщенное состояние при плотности потока более 0,7 Тл. Датчик можно также запрограммировать на любой диапазон измерения менее 360°, что обеспечивает дополнительную функциональную безопасность посредством контроля выхода за границы диапазона.

Этот принцип используется в модулях педали газа.

Магниторезистивные датчики

В дополнение к трансверсально-направленному эффекту Холла, полупроводниковые пластинки также подвержены эффекту продольного сопротивления, также известному как эффект Гаусса. Элементы, использующие этот эффект, называются магниторезисторами (торговая марка Siemens) и изготавливаются из полупроводника III-V, кристаллического антимонида индия (InSb). В отличие от датчиков Холла, оптимальная форма пластинки для магниторезистора более короткая и толстая и обеспечивает очень маленькое сопротивление. Поэтому для получения технически применимых значений сопротивления в килоомном диапазоне необходимо последовательно соединять большое количество этих пластинок. Эта проблема элегантно решается путем добавления в полупроводниковый кристалл микроскопически мелких иголок из антимонида никеля с очень хорошей проводимостью. Они располагаются перпендикулярно направлению тока. Еще одной мерой является применение меандровых технологий для полупроводникового резистора.

Зависимость сопротивления от магнитной индукции B следует квадратичной функции до индуктивностей порядка 0,3 Тл, а выше этого уровня она становится все более линейной. Верхнего предела в диапазоне управления не существует, и динамическая реакция в

Рис. 17. Измерение углового положения в диапазоне 360° с помощью четверного датчика Холла

Используется в модуле педали газа.

a – организация измерения;

b – первичные выходные сигналы.

1 – четверной датчик Холла; 2 – магнит



технических областях применения, как и в случае с датчиком Холла, может считаться не имеющей задержек.

Поскольку температурная чувствительность имеет ярко выраженный эффект на сопротивление магниторезисторов (примерно 50-процентное снижение на 100 К), они обычно бывают только в двойной конфигурации в цепях делителей напряжения (дифференциальные магниторезисторы). Для конкретной области применения каждая из двух секций резистора должна быть магнитоуправляемой (по возможности с противоположными полярностями). Несмотря на высокий температурный коэффициент отдельных резисторов, цепь делителей напряжения гарантирует хорошую стабильность рабочей точки (точки, в которой обе секции резистора имеют одинаковое значение).

Для достижения хорошей чувствительности измерений лучше всего эксплуатировать магниторезисторы в магнитной рабочей точке между 0,1 и 0,3 Тл. Обычно необходимая магнитная основа обеспечивается небольшим постоянным магнитом (рис. 18), эффект которого можно усилить с помощью небольшой магнитной возвратной пластины. Магниторезистор обладает ярко выраженной температурной чувствительностью, так что он используется почти исключительно в инкрементных датчиках угла поворота и перемещения или в бинарных датчиках с ограничением значений (с переключающей характеристикой). Магниторезистивный инкрементный датчик используется для измерения регулировки момента впрыска в топливных насосах высокого давления VE в двигателях с распределенным впрыском дизельного топлива.

Основным преимуществом магниторезистора является его высокий уровень сигнала, обычно вольтового порядка. Это означает, что не требуются усиление и локальные электронные схемы и связанные с этим меры защиты, которые обычно необходимы. Кроме того, будучи пассивными резистивными компонентами, эти датчики очень нечувствительны к электромагнитным помехам и, в результате их высокого напряжения смещения, практически неуязвимы для внешних магнитных полей.

Магниторезистивные NiFe тонкопленочные датчики (AMR)

Слои NiFe толщиной всего 30–50 нм демонстрируют электромагнитные анизотропические свойства, т.е. их электрическое сопротивление изменяется под влиянием магнитного поля. Поэтому резистивные структуры этого типа называют анизотропическими магниторезистивными (AMR) элементами или просто AMR-датчиками. Обычно используемый металлический сплав также называют пермаллоем.

Рис. 18. Дифференциальный магниторезистивный датчик:
1 – магниторезисторы R_1, R_2;
2 – магнитномягкая подложка;
3 – постоянный магнит, 4 – шестерня;
U_0 – напряжение питания;
$U_A(\varphi)$ – напряжение измерения угла поворота φ

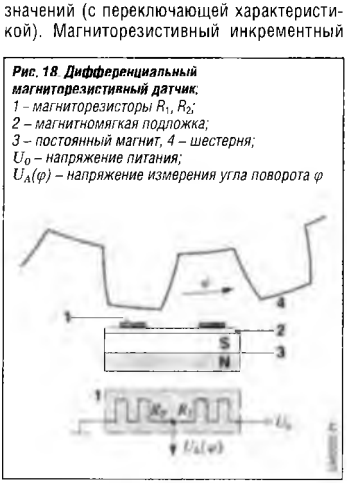
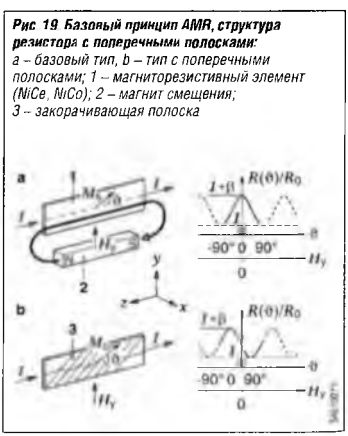


Рис. 19. Базовый принцип AMR, структура резистора с поперечными полосками:
a – базовый тип, b – тип с поперечными полосками; 1 – магниторезистивный элемент (NiCe, NiCo); 2 – магнит смещения; 3 – закорачивающая полоска



Технология и типы

На вытянутой резистивной полоске, как показано на рис. 19, а, происходит небольшое, самопроизвольное намагничивание M_S в продольном направлении токопроводящей дорожки даже без внешнего управляющего поля (анизотропия формы). Чтобы придать этому намагничиванию четко определенное направление – теоретически, оно может быть в другом направлении – AMR-датчики часто снабжаются слабыми смещающими магнитами. В этом состоянии последовательное сопротивление имеет самое большое значение $R_{\parallel}$. Если вектор намагничивания поворачивается под влиянием дополнительного внешнего поля H_y на угол ϑ, то последовательное сопротивление постепенно уменьшается, пока не примет при $\vartheta = 90°$ минимальное значение $R_{\perp}$. Здесь сопротивление зависит только от угла ϑ между получающимся намагничиванием M_S и током I, оно имеет примерно косинусоидную характеристику как функцию от ϑ:

$$(5)\quad R = R_0\,(1+\beta\cdot\cos^2\vartheta),$$
$$\text{где } R_{\parallel} = R_0\cdot(1+\beta)\ ;\ R_{\perp} = R_0.$$

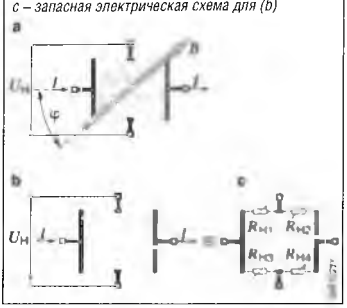
Коэффициент β обозначает максимально возможное изменение сопротивления и примерно равен 3 %. Если внешнее поле намного сильнее произвольного намагничивания, а это обычно имеет место при использовании управляющих магнитов, то эффективный угол почти полностью будет зависеть от направления внешнего поля. Теперь напряженность поля не имеет значения, иными словами, датчик теперь работает в «насыщенном состоянии».

Закорачивающие полоски высокой проводимости (например, золотые) на AMR-пленке заставляют ток течь под углом менее 45° к произвольному намагничиванию (продольное направление) без воздействия внешнего поля. В результате кривая этого датчика смещается на 45° по сравнению с кривой простого резистора (рис. 19, b). Это означает, что даже при напряженности внешнего поля $H_y = 0$ кривая находится в точке максимальной чувствительности измерения (в точке возврата). «Нанесение дорожек у двух резисторов в противоположных направлениях» означает, что их сопротивления изменяются в противоположных направлениях под воздействием одного и того же поля. Иными словами, когда одно сопротивление растет, другое падает. Кроме того, преимущество AMR-датчиков состоит в том, что будучи тонкопленочными датчиками, они могут регулироваться, например, путем лазерной подгонки до заданного значения (например, нулевой точки).

Подложка датчика состоит из слоев оксида кремния, в которые, при необходимости, может быть встроена электронная схема обработки сигналов. В настоящее время жесткая экономия диктует необходимость, по большей части, раздельного изготовления пластинки датчика и электронного чипа, и последующего монтажа на общую рамку с внешними выводами и пакетирования. Управляющее магнитное поле B создается, большей частью, магнитом, которому придается поступательное или вращательное движение через датчик.

В дополнение к простым двухполюсным AMR-элементам имеются также псевдодатчики Холла, например, прямоугольные NiFe тонкопленочные структуры, которые, как уже описанные обычные датчики Холла, имеют четыре контакта: два для пути прохождения тока и два поперечных для снятия (псевдо-) напряжения Холла (рис. 20, а). Но в отличие от обычного датчика Холла псевдо-датчик Холла чувствителен к магнитным полям в плоскости пленки, а не перепендикулярно ее поверхности. Кроме того, псевдодатчик Холла не дает пропорциональной характеристической кривой; он имеет синусоидную кривую с очень высокой точностью формы, которая ни в коем случае не зависит от напряженности управля-

Рис. 20. Псевдодатчик Холла:
a – полная базовая форма;
b – модифицированная форма с «опустошенной» поверхностью,
c – запасная электрическая схема для (b)



ющего поля и температуры. Для поля, параллельного пути прохождения тока, выходное напряжение исчезает, чтобы затем описать полупериод синусоиды при повороте поля на угол $\varphi = 90°$. Поэтому синусоидальное напряжение получает амплитуду $\hat{u}_н$:

$$U_н = \hat{u}_н \sin 2\varphi .$$

Если внешнее управляющее поле повернуть один раз на $\varphi = 360°$, выходное напряжение пройдет два полных периода синусоиды. Однако амплитуда $\hat{u}_н$ сильно зависит от температуры и воздушного зазора между датчиком и управляющим магнитом; она уменьшается с ростом температуры и воздушного зазора.

Чувствительность измерений такого псевдо-элемента Холла можно значительно повысить (без излишнего искажения синусоидальной формы) путем «опустошения» элемента изнутри так, чтобы осталась только «рамка» (рис. 20, b). Эта модификация превращает псевдодатчик Холла в полный мост, состоящий из четырех AMR-резисторов (рис. 20, c). Даже когда мостовые резисторы имеют форму меандра, при условии, что данная минимальная ширина проводника не станет меньше, это все равно практически не влияет на синусоидальную форму сигнала.

AMR-датчики линейного и углового перемещения

Простой датчик углового перемещения для диапазонов <30°

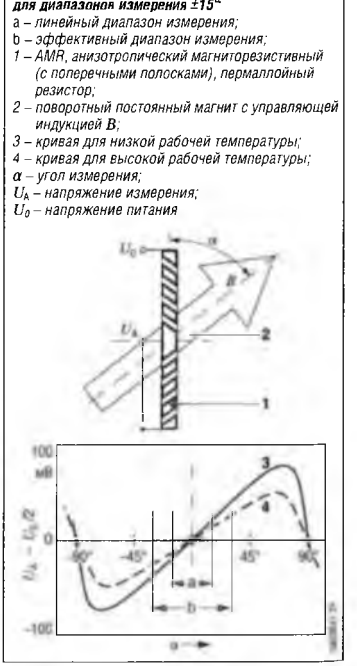
AMR-датчики углового перемещения с ограниченной точностью и ограниченным диапазоном измерения (до ±15°) зависят от дисбаланса магниторезистивного делителя напряжения, состоящего из вытянутого (он может быть также в форме меандра) пермаллойного резистора с золотыми поперечными полосками высокой проводимости (рис. 21). В таких датчиках именно нулевая точка в значительной степени зависит от расстояния между магнитом и датчиком, а не начало характеристической кривой, которое все еще зависит от температуры (температурный коэффициент примерно равен $-3 \cdot 10^{-3}$/K). Такие датчики уже рассматривались в качестве экономичной альтернативы для измерения положения педалей.

Простой датчик линейного перемещения для миллиметрового диапазона

Можно также использовать отдельные дифференциальные штырьки с поперечными полосками для создания простейших датчиков перемещения с типичным диапазоном измерения в несколько миллиметров. Однако для достижения высокого уровня точности требуется постоянный зазор между датчиком и движущимися магнитами, что позволяет измерять положение s. Температурный коэффициент градиента кривой можно легко компенсировать с помощью дополнительного металлического тонкопленочного датчика на той же подложке, дающего примерно тот же температурный коэффициент, только с обратной полярностью (например, Pt, Ti, Ni).

Рис. 21. Магниторезистивный датчик углового положения (с поперечными полосками) для диапазонов измерения ±15°

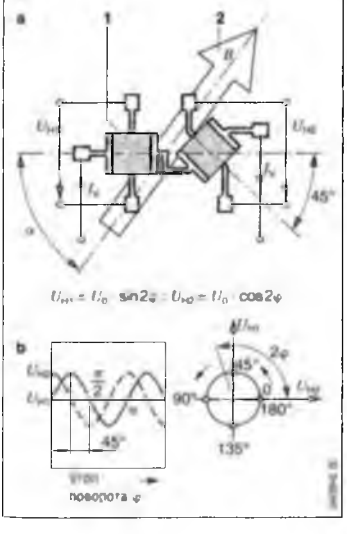
a – *линейный диапазон измерения;*
b – *эффективный диапазон измерения;*
1 – *AMR, анизотропический магниторезистивный (с поперечными полосками), пермаллойный резистор;*
2 – *поворотный постоянный магнит с управляющей индукцией* B;
3 – *кривая для низкой рабочей температуры;*
4 – *кривая для высокой рабочей температуры;*
α – *угол измерения;*
U_h – *напряжение измерения;*
U_0 – *напряжение питания*



Датчик угла поворота в пределах до 180°

Магниторезистивные псевдодатчики Холла для измерения угла поворота используют практически на 100% синусоидальный сигнал, снимаемый с выходных контактов четырехконтактной структуры, при этом два полных периода электрического выходного сигнала соответствуют механическому вращению магнитов на 360°. С помощью второго элемента, повернутого на 45°, создается также косинусоидальный сигнал (рис. 22). Применив функцию арктангенса, можно через соотношение двух напряжений сигнала определить угол измерения с помощью микроконтроллера или специализированной интегральной схемы ASIC (см. рис. 23). Это применимо в диапазоне 180° и большей частью не зависит от изменений температуры и колебаний магнитных полей (зазоров, старения).

Рис. 22. Магниторезистивный датчик углового положения (псевдодатчик Холла):
a – принцип измерения; b – кривая напряжения, I_v – питающий ток, U_{m1}, U_{m2} – напряжения измерения, α – угол измерения



Еще одним условием высокой точности этого датчика является как минимум совпадение направления поля в обоих мостах (сверх заданной величины напряженность поля роли не играет). Это может быть гарантировано только в случае, когда оба моста находятся непосредственно один над другим. Была разработана конструкция, где два моста, расположенные под углом 45° друг к другу, были переплетены так, как будто бы они находились в одной точке и «друг на друге» (рис. 24).

Рис. 23. Технически используемая полномостовая форма псевдодатчика Холла:
a – цепь; b – характеристика сигнала

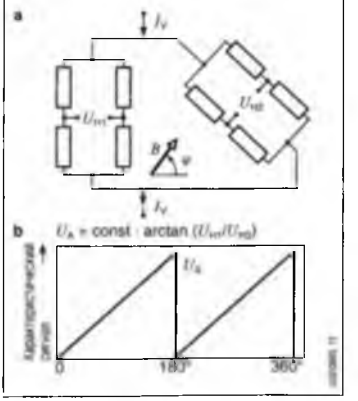
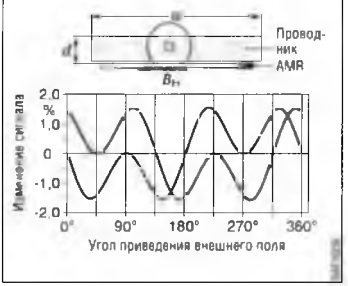


Рис. 24. Переплетенная конструкция из двух мостов AMR, повернутых на 45°



Рис. 25. Расширение AMR-датчика углового положения со 180° до 360° электромагнитно создаваемым вспомогательным полем $B_н$



Датчик угла поворота в пределах до 360°

Для таких областей применения, как, например, измерение угла поворота рулевого колеса (например, LWS4, рис. 26), изображенный на рис. 17 датчик углового положения можно расширить до диапазона 360°. С помощью дополнительного вспомогательного поля $B_н$, электромагнитно создаваемого через токопроводящие дорожки (под AMR-пластинкой) можно определить, в какой половине полного оборота находится управляющий магнит – в первой или во второй. Датчик можно установить только на конце какого-либо вращающегося вала. Таким образом, его можно установить, к примеру, на конце рулевого вала для измерения угла поворота рулевого колеса в системах, работающих без определения нескольких оборотов.

Датчик углового положения в диапазоне более 360° (определение нескольких оборотов)

Для измерения количества оборотов вращающейся детали (например, рулевого вала) можно использовать конфигурацию из двух псевдодатчиков Холла (под углом 180°). Два соответствующих постоянных магнита вращаются через редуктор с большим передаточным отношением (рис. 27). Поскольку две малые выходные шестерни, на которых закреплены управляющие магниты, отличаются на один зуб (количество зубьев m и $m+1$), то их взаимный фазовый угол (разность углов поворота: $\Psi - \Theta$) является мерой абсолютного углового положения φ рулевого вала. Система конструируется таким образом, что эта фазовая разность не превышает 360° для четырех оборотов рулевого вала, что гарантирует четкость измерения. Учитывая, что каждый датчик также предлагает индетерминантную (неопределимую) разрешающую способность угла поворота, при таком расположении для полного диапазона угла поворота рулевого вала можно получить более высокое разрешение, например, менее 1°.

GMR-датчики

GMR-датчики (гигантские магниторезистивные) были разработаны несколько лет назад и теперь впервые используются в автомобилестроении для определения углового положения и скорости вращения. Главными преимуществами GMR-датчиков над AMR-датчиками являются естественный диапазон в 360° для определения углового положения и более высокая чувствительность магнит-

Рис. 26. AMR-датчик углового положения LWS4, смонтированный на конце управляемой оси:
1 – рулевая колонка; 2 – рулевая передача; 3 – датчик угла поворота, 4 – рулевая рейка

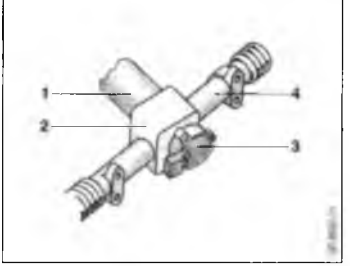
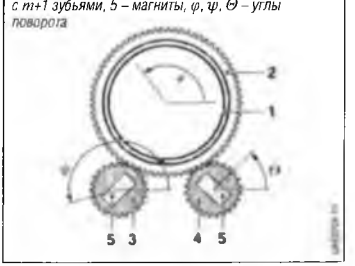


Рис. 27. AMR-датчик углов поворота шестерен рулевого вала:
1 – рулевой вал; 2 – венец рулевого вала с n зубьями, 3 – шестерня с m зубьями, 4 – шестерня с m+1 зубьями, 5 – магниты, φ, ψ, Θ – углы поворота

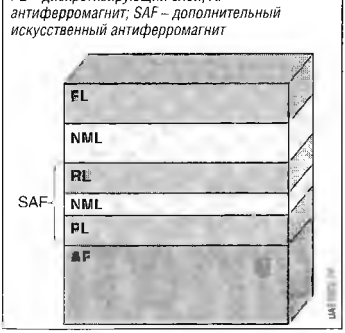


ного поля при определении скорости вращения.

Спин-клапанная структура GMR состоит из антиферромагнитного, ферромагнитного и немагнитного функциональных слоев (рис. 28). Толщина отдельных слоев в обеих системах находится в диапазоне 1–5 нм, т.е. это несколько слоев атомов. Для определения углового положения необходимое опорное намагничивание создается посредством того, что направление намагничивания одного из ферромагнитных слоев (PL) фиксируется путем взаимодействия с соседним антиферромагнитным слоем (AF). Поэтому данный слой также называют «фиксируемым слоем». С одной стороны, намагничивание второго ферромагнитного слоя (FL), в значительной степени магнитно изолированного за счет немагнитного промежуточного слоя (NML), можно свободно поворачивать внешним магнитным полем. Соответственно, этот слой называют «свободным слоем».

Сопротивление изменяется с косинусоидальной зависимостью от угла φ между направлением внешнего поля и опорным направлением. Крайне важной для точности измерения углового положения является устойчивость опорного намагничивания к воздействию внешнего поля. Эта устойчивость сильно повышается с помощью дополнительного искусственного антиферромагнита (SAF).

Рис. 28. Спин-клапанная структура GMR:
FL – свободный слой; NML – немагнитный промежуточный слой, RL – опорный слой; PL – дискретизирующий слой; AF – антиферромагнит; SAF – дополнительный искусственный антиферромагнит



Датчики скорости и частоты вращения

Измеряемые переменные и принципы измерения

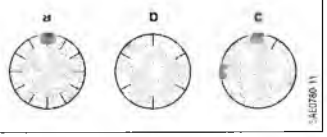
Датчики скорости и частоты вращения измеряют количество оборотов или расстояние, пройденное за определенное время. Применительно к автомобилестроению в обоих случаях – это измеряемые переменные, возникающие между двумя компонентами или относительно поверхности дороги либо другого автомобиля. Однако иногда необходимо измерить абсолютную скорость вращения в пространстве, т.е. вокруг осей автомобиля (скорость вращения вокруг вертикальной оси). Например, для системы динамической стабилизации (ESP) скорость вращения автомобиля вокруг вертикальной оси должна вычисляться путем «считывания».

В инкрементном определении относительной скорости вращения вокруг вертикальной оси, в зависимости от количества и размера сканируемых периферийных меток ротора, различают следующие типы датчиков (рис. 1):

- простой датчик оборотов, только с одной сканируемой меткой на оборот, что позволяет определить только среднюю скорость вращения;
- сегментный датчик, лишь с небольшим количеством сканируемых периферийных сегментов (например, эквивалентных количеству цилиндров двигателя);
- инкрементный датчик с близко расположенными периферийными метками. До определенного момента эта форма датчика позволяет измерять мгновенную скорость в точках на окружности и, соответственно, регистрировать очень мелкие угловые доли.

Примерами относительной частоты вращения являются частота вращения коленчатого или распределительного вала двигателя,

Рис. 1. Регистрация относительной частоты вращения:
a – инкрементный датчик; b – сегментный датчик; c – датчик частоты вращения



частота вращения кулачкового вала топливного насоса высокого давления дизеля, частота вращения колес автомобиля (ABS, TCS, ESP). Измерения в основном выполняются с помощью системы инкрементных датчиков, состоящей из шестерни и датчика частоты вращения.

Формы датчиков

Используются различные формы датчиков (рис. 2): стержневые, вильчатые и кольцевые (внутренние и внешние). Благодаря простоте монтажа, самым распространенной формой датчика является стержневая. Стержневой датчик размещается рядом с ротором, зубья которого приближаются к нему и проходят в непосредственной близости. Однако датчики такой формы имеют самую низкую чувствительность измерений. В некоторых случаях допускается использование вильчатых датчиков, нечувствительных к осевому и радиальному люфту. В установленном состоянии этот датчик должен быть примерно совмещен с ротором. Тип датчика, в котором датчик окружает вал ротора в форме кольца, уже практически не используется.

Требования к новым датчикам

Во многих отношениях более ранние традиционные датчики индуктивного типа показывают очень неудовлетворительные результаты. Они выдают амплитуду, зависимую от частоты вращения, и поэтому непригодны для низких оборотов, допускают лишь относительно небольшие допуски воздушного зазора, и большей частью неспособны отличить колебания зазора от импульсов частоты вращения. По крайней мере, конец датчика – из-за своей близости к тормозу (в случае с датчиками скорости вращения колес), должен быть стойким к высоким температурам. Эти недостатки находятся позади дополнительных функций, на которые нацелено новое поколение датчиков:

- статическое определение (т.е. при нулевой скорости: сверхмалые обороты коленчатого вала или частота вращения колес);
- эффективное измерение в больших зазорах (несовмещенный монтаж с зазорами > 0);
- небольшой размер;
- эффективная работа независимо от колебаний зазора;
- термостойкость до 200 °C;
- определение направления (опция для системы навигации);
- определение опорной метки (зажигание);

Рис. 2. Различные формы датчиков:
a – вильчатый (лопастной датчик);
b – стержневой (датчик приближения),
d_r – воздушный зазор между датчиком и ротором

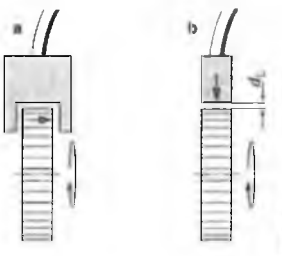
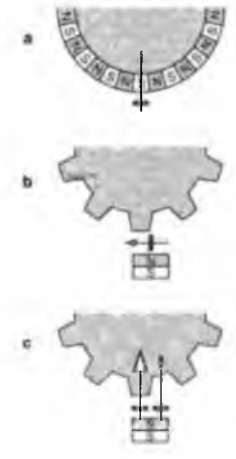


Рис. 3. Схемы расположения датчиков, нечувствительные к колебаниям воздушного зазора:
a – датчик радиального поля с полюсным колесом;
b – тангенциальный датчик,
c – дифференциальный датчик с приводом



Магнитостатические датчики (датчики Холла, магниторезисторы, AMR) очень хорошо отвечают первым двум требованиям. И, как правило, они также обеспечивают соответствие второму и третьему требованиям.

На рис. 3 показаны три, в принципе, приемлемые формы датчиков, обычно нечувствительные к колебаниям зазора. Здесь следует различать датчики с радиальным и тангенциальным считыванием. Это означает, что, независимо от зазора, магнитостатические датчики всегда смогут отличить северный и южный полюса магнитноактивного полюсного колеса или роторного кольца. В случае с магнитопассивными роторами знак выходного сигнала уже не будет зависеть от зазора при регистрации напряженности тангенциального поля (хотя тот факт, что зазор часто увеличивается из-за ротора, является здесь недостатком). Однако часто используются также радиально измеряющие градиентные датчики, которые по сути лишь регистрируют градиент радиального поля, изменяющий свой знак не при изменении зазора, а только при изменении угла поворота.

Роторы

Ротор имеет ключевое значение для измерения скорости вращения; однако он обычно поставляется автопроизводителем, в то время как сам датчик приходит от поставщика. До недавних пор почти исключительно использовались магнитопассивные роторы, состоящие из магнитомягкого материала, обычно железа. Они дешевле магнитотвердых полюсных колес и проще в обращении, поскольку не намагничиваются, и нет опасности взаимного намагничивания (например, во время хранения). Как правило, при одинаковых инкрементной ширине и выходном сигнале, внутренний магнетизм полюсного колеса (полюсное колесо определяется как магнитноактивный ротор) допускает значительно больший зазор.

Современные датчики

Градиентные датчики

Содержат постоянный магнит, полюс которого обращен к зубчатому колесу. Его поверхность гомогенезирована тонкой ферромагнитной пластиной, на которой расположены два гальваномагнитных элемента на расстоянии примерно половины зубчатого интервала. Таким образом, один из элементов всегда находится напротив межзубного промежутка, а другой – напротив зуба. Измеряется различие в напряженности поля в двух смежных местоположениях на окружности. Выходной сигнал приблизительно пропорционален отклонению силы поля как функции угла на окружности, поэтому полярность не зависит от зазора.

Тангенциальные датчики

Тангенциальные датчики отличаются от их аналогов градиентного типа способом получения вариаций в полярности и напряженности магнитного поля, в компонентах, расположенных касательно к окружности ротора. Варианты конструкции включают тонкопленочную технологию AMR (вытянутые резисторы с поперечными полосками) или резисторы из одного сплава, по полу- или полной мостовой схеме. В отличие от градиентных датчиков, их не требуется адаптировать к конкретному шагу зубьев ротора, и они могут выполнять считывание в данной точке. Требуется локальное усиление, хотя их измерительный эффект на 1–2 порядка выше, чем у кремниевых датчиков Холла.

При использовании интегрированного в подшипник датчика частоты вращения коленчатого вала, на общей рамке с выводами устанавливаются тонкопленочный анизотропный магниторезистивный датчик (AMR-датчик) и монолитная интегральная схема, производящая вычисления. С целью экономии пространства и защиты от влияния

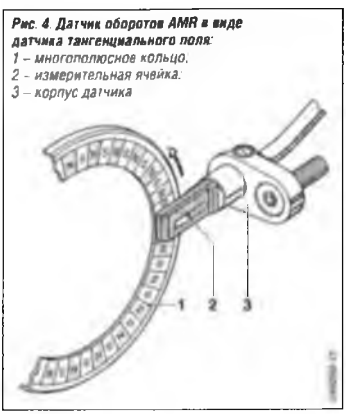


Рис. 4. Датчик оборотов AMR в виде датчика тангенциального поля:
1 – многополюсное кольцо,
2 – измерительная ячейка,
3 – корпус датчика

температуры, интегральная схема устанавливается под углом 90°.

Колебательные гирометры

Позволяют измерять абсолютную частоту вращения при поворотах автомобиля (отклонения вертикальной оси); в частности, это требуется в системах контроля динамики автомобиля VDC, стабилизации заноса и навигации. Принцип действия базируется на свойствах механических гироскопов; при измерении используется ускорение Кориолиса, сопутствующее колебательному движению:

$$a_{Coriolis} = a_x = 2 \cdot v_y \cdot \Omega_z.$$

Скорость v_y изменяется синусоидально, в соответствии с колебательным движением:

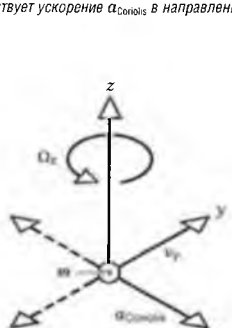
$$v_y = \hat{v}_y \cdot \sin \omega t.$$

При постоянной скорости вращения вокруг вертикальной оси Ω_z создается синусоидальное ускорение Кориолиса с такими же частотой, положением и фазовым углом, а значение амплитуды будет следующим:

$$a_{Coriolis} = 2 \cdot \hat{v}_y \cdot \Omega_z.$$

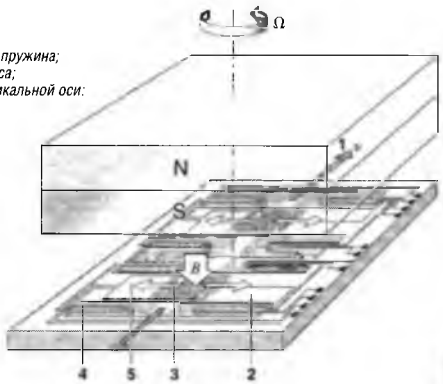
Это ускорение можно измерить блоком наблюдения, также движущимся на материальной точке m (рис. 5). Чтобы определить скорость вращения вокруг вертикальной оси, используется подходящий орган управления для эффективного поддержания амплитуды колебаний на постоянном уровне и выпрямления ускорения Кориолиса, измеренного на колеблющейся массе m с выбором фазы и частоты (например, с помощью синхронизирующего усилителя). В этом процессе удаляется нежелательное ускорение извне (например, ускорение кузова).

Рис. 5. Создание ускорения Кориолиса: *Когда материальная точка m движется в направлении y со скоростью v_y, и система одновременно вращается вокруг вертикальной оси z со скоростью Ω_z, на материальную точку воздействует ускорение $a_{Coriolis}$ в направлении x*



Микромеханические кремниевые датчики скорости вращения автомобиля вокруг вертикальной оси обеспечивают недорогую и компактную альтернативу использующимся в настоящее время прецизионным пьезоэлектрическим датчикам. Объединение технологий позволяет достигать высокой точности, необходимой для динамических систем автомобиля (рис. 6). Две толстые пастированные пластины, изготовленные из платы посредством объемной микромеханики колеблются в двухтактном режиме на своей резонансной частоте, которая определяется их массой и жесткостью сцепляющей пружины (> 2 кГц). Каждая плата снабжена располагаемым на поверхности микромеханическим емкостным датчиком ускорения, который служит для измерения ускорения Кориолиса (поворотного ускорения) Ω_z в плоскости кристаллической пластины, расположенной перпендикулярно к направлению колебаний, когда кристалл датчика поворачивается вокруг своей вертикальной оси с угловой скоростью. Получаемые сигналы пропорциональны произведению угловой скорости и скорости возвратно-поступательного движения, которая регулируется электроникой до установления постоянной величины. На колеблющейся плате имеется изготовленный печатным способом простой проводник, на который действуют силы Лоренца в поле постоянного магнита, направленном перпендикулярно поверхности кристалла. Таким образом, проводник используется для измерения частоты колебаний как напрямую, так и индуктивным способом при том же магнитном поле. Различные физические характеристики приводных и сенсорных систем предупреждают недопустимые перекрестные помехи. Для того чтобы исключить внешнее ускорение (сигнал общего режима), два противоположных сигнала датчика вычитаются один из другого (суммирование используется для

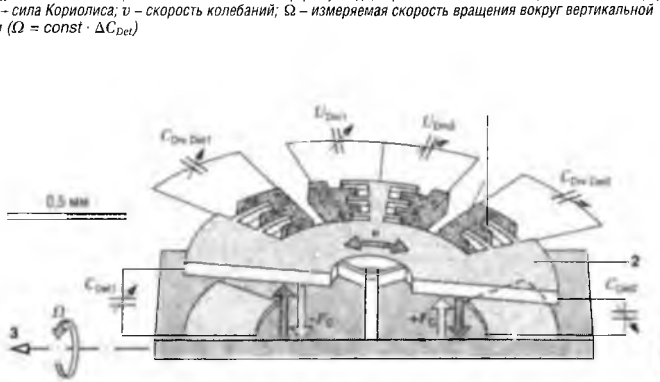
Рис. 6. Микромеханический датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси MM1 с электродинамическим приводом:
1 – направление колебаний;
2 – вибрирующий элемент;
3 – датчик ускорения Кориолиса;
4 – удерживающая и направляющая пружина;
5 – направление ускорения Кориолиса;
Ω – скорость вращения вокруг вертикальной оси;
υ – скорость колебаний



определения внешнего ускорения). Точная микромеханическая структура помогает подавить эффект большого колебательного ускорения, которое на несколько порядков выше ускорения Кориолиса нижнего уровня (поперечная чувствительность значительно ниже 40 дБ). Приводные и измерительные системы в понятиях механического и электрического действий являются строго изолированными.

Если кремниевый датчик скорости вращения вокруг вертикальной оси изготавливать в полном соответствии с поверхностной микромеханикой (SMM), а магнитный привод и систему управления заменить электростатической системой, это изолирование может

Рис. 7. Датчик вращения вокруг вертикальной оси SMM MM2 (поверхностная микромеханика) с электростатическим приводом:
1 – гребенчатая структура; 2 – поворотный вибратор; 3 – ось измерения, $C_{Dr\upsilon}$ – емкость электродов привода; C_{Det} – емкостный поворотно-колебательный отбор (синусоида, переменные колебания в ритме осциллятора); F_C – сила Кориолиса; υ – скорость колебаний; Ω – измеряемая скорость вращения вокруг вертикальной оси ($\Omega = const \cdot \Delta C_{Det}$)



быть реализовано менее последовательно: установленный по центру роторный генератор, работающий по законам электростатики, служит для получения колебаний с амплитудой, которая постоянно регулируется емкостным измерительным преобразователем (рис. 7). В случае, когда $\Omega \neq 0$, силы Кориолиса инициируют одновременное наклонное движение «вне плоскости» с амплитудой, пропорциональной скорости вращения вокруг вертикальной оси и определяемой емкостным способом – электродами, расположенными под генератором. Для того чтобы это движение не слишком амортизировалось, датчик должен работать в вакууме. Хотя меньший размер кристалла и более простой процесс его изготовления и уменьшают стоимость такого датчика, миниатюризация приводит к ухудшению точности измерения. Это предъявляет более высокие требования к электронике. Влияние внешних ускорений здесь уже устраняется механически. Это второе поколение датчиков скорости вращения вокруг оси обозначается аббревиатурой MM2 и используется главным образом в системах защиты пассажиров для определения скорости вращения вокруг продольной оси (бокового раскачивания).

Дальнейшие разработки в области систем стабилизации автомобилей предъявляют все более высокие требования к качеству и мощности сигнала. Они требуют дополнительных осей измерения с высокой надежностью. Третье поколение датчиков (MM3) производства Bosch отвечает этим требованиям. В этих датчиках используется новое поколение микромеханических элементов. Они измеряют угловые скорости вращения и ускорения, а измеряемые переменные подвергаются цифровой обработке.

Датчики ускорения и вибрации

Эти датчики могут использоваться для включения системы пассивной защиты автомобиля, выявления детонации и управления работой двигателя, а также контроля поперечных ускорений и изменений скорости полноприводных автомобилей с ABS.

Таблица 1. Примеры типичных значений ускорения в автомобиле

Применение	Диапазон
Предотвращение детонации	1...10 g
Защита пассажира	
– подушка безопасности, натяжное устройство ремней безопасности	50 g
– бампер для защиты при опрокидывании	4 g
– инерционная катушка ремня безопасности	0,4 g
AEC, ESP	0,8 ...1,2 g
Шасси и управление подвеской:	
– конструкция	1 g
– ось	10 g

Принципы измерения

Все датчики ускорения измеряют силы, воздействующие на (инертные) массы m путем ускорения a согласно основному закону механики:

$$F = m \cdot a \qquad \text{(уравнение 1)}.$$

Как и в случае с измерением силы, существуют системы для измерения и положения и механического напряжения. Первые особенно широко используются в области малых ускорений. Системы измерения положения также позволяют использовать компенсационный метод, в котором вызванное ускорением системное отклонение компенсируется эквивалентной восстанавливающей силой, так что в идеале система практически всегда работает очень близко к нулевой точке (высокая линейность, минимальная перекрестная чувствительность, стойкость к высоким температурам). Эти системы с управлением по положению также имеют большую жесткость и частоту отсечки, чем системы перемещения того же типа. Здесь можно электронно

создать любой недостаток механической амортизации.

Все датчики ускорения крепятся через пружины прямо к гравитационному маятнику. Иными словами, инертная масса эластично соединяется с кузовом, ускорение которого требуется измерить. Это означает, что в статическом случае сила ускорения находится в равновесии с восстанавливающей силой, воздействующей на пружину, отклоненную на x:

$$F = m \cdot a = c \cdot x \qquad \text{(уравнение 2)},$$

где c – постоянная пружины.

Следовательно, чувствительность измерения S будет равна:

$$S = x/a = m/c \qquad \text{(уравнение 3)}.$$

Другими словами, большая масса вместе с небольшой жесткостью пружины (или постоянной пружины) дают высокую чувствительность измерения. Если же уравнение 2 записать полностью для статического и динамического случаев, то станет очевидно, что необходимо учитывать не только эластичность пружины, но и силу трения, и силу инерции:

$$F = m \cdot a = c \cdot x + p \cdot \dot{x} + m \ddot{x} \qquad \text{(уравнение 4)}.$$

Эти компоненты пропорциональны логическим выводам в отношении времени перемещения x (p – коэффициент трения). Получающееся дифференциальное уравнение описывает колеблющуюся (резонирующую) систему. Если трение считать ничтожно малым ($p \approx 0$), то резонансная частота системы будет равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \qquad \text{(уравнение 5)}.$$

Таким образом, согласно уравнению (3) чувствительность измерения S напрямую связана с резонансной частотой ω_0:

$$S\,\omega_0^2 = 1 \qquad \text{(уравнение 6)}.$$

Иными словами, можно ожидать, что при увеличении резонансной частоты вдвое чувствительность уменьшится в четыре раза. Конечно, такие пружинно-массовые системы демонстрируют адекватную пропорциональность между измеренной переменной и амплитудой только при частоте, которая ниже их резонансной частоты.

В случае чисто амплитудных систем необходимо обеспечить амортизацию, которая должна быть как можно точнее определена и как можно меньше зависима от температуры для получения как можно более унифициро-

Рис. 1. Датчики ускорения, измеряющие смещение: *a – датчик ускорения, измеряющий амплитуду; b – датчик ускорения с управлением по положению; a – измеряемое ускорение; x – системная амплитуда; F_M – измерительная сила (инерционная сила, приводящаяся на массу m); F_K – компенсаторная сила; I_A – выходной ток; U_A – выходное напряжение*

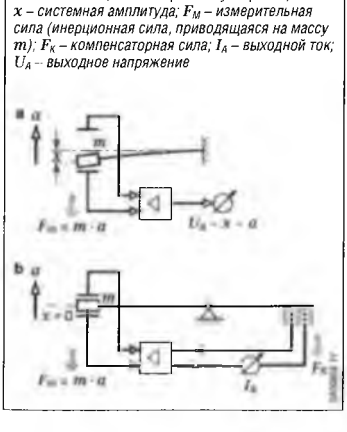
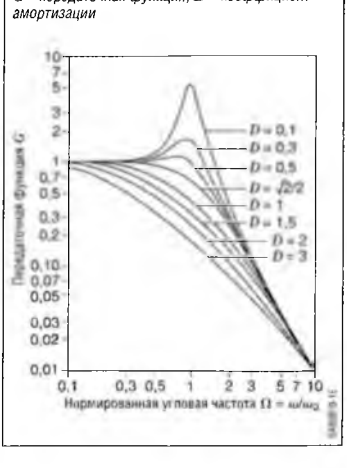


Рис. 2. Амплитудно-резонансная кривая: *G – передаточная функция, D – коэффициент амортизации*



ванного отклика частоты (рис. 2) и предотвращения разрушительной остроты резонанса, которая может легко вывести систему из строя. Если коэффициент трения p нормализовать до других параметров дифференциального уравнения (4), то получим стандартизированный коэффициент амортизации D.

$$D = \frac{p}{2 \cdot c} \cdot \omega_0 = \frac{p}{2\sqrt{c \cdot m}} \quad \text{(уравнение 7)}.$$

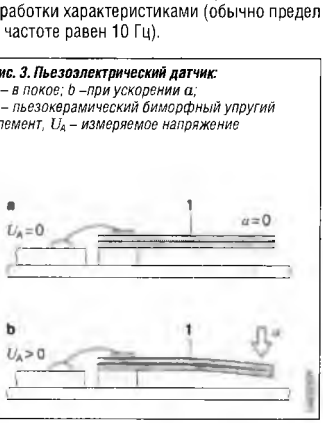
Этот коэффициент амортизации в значительной степени определяет переходную и резонансную характеристики. В то время как при периодическом возбуждении с коэффициентами амортизации $D > \sqrt{2}/2 \approx 0{,}707$ большей остроты резонанса уже не возникает (рис. 2), любое колеблющееся переходное состояние в случае ступенчатого возбуждения исчезает при коэффициенте $D > 1$. Для достижения как можно более широкой полосы пропускания на практике обычно используют компромиссные значения $D \approx 0{,}5$–$0{,}7$.

Применение

Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические биморфные упругие элементы (двухслойная пьезокерамика) используются в пусковых устройствах аварийных натяжителей ремней безопасности, подушек безопасности и штанг против опрокидывания автомобиля. Их инерционная масса под действием ускорения вызывает деформацию, обеспечивающую достаточный динамический сигнал с благоприятными для обработки характеристиками (обычно предел по частоте равен 10 Гц).

Рис. 3. Пьезоэлектрический датчик:
a – в покое; b –при ускорении a;
1 – пьезокерамический биморфный упругий элемент, U_A – измеряемое напряжение



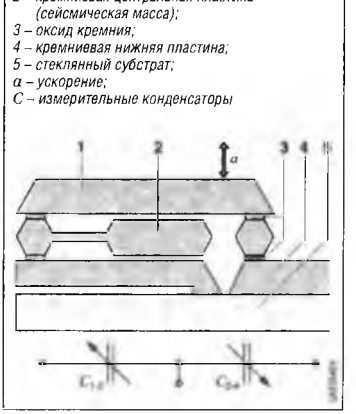
Чувствительный элемент датчика расположен в герметичном корпусе, содержащем также предварительный усилитель сигнала. Иногда в целях физической защиты его помещают в гель. Принцип активации датчика можно также инверсировать. Дополнительный активирующий электрод упрощает проверку датчика (бортовая диагностика).

Продольные элементы используются в качестве датчиков детонации (датчиков ускорения) в отслеживающих системах зажигания. С их помощью измеряется вибрационный шум в блоке двигателя (измеряемый диапазон ускорений составляет приблизительно 10 g при обычной частоте колебаний 5–20 кГц). Некапсулированное пьезокерамическое кольцо измеряет силы инерции, воздействующие на сейсмическую массу той же формы. Однако сегодня для обнаружения детонации почти исключительно используются более современные поверхностно-микромеханические датчики.

Емкостные кремниевые датчики ускорения

Первое поколение микромеханических датчиков основывалось на анизотропии и селективных методах травления для получения необходимых свойств системы «пружина-масса» в пластине (объемная кремниевая микромеханика) и необходимого профиля пружины (рис. 4).

Рис. 4. Объемный кремниевый датчик ускорения:
1 – кремниевая верхняя пластина;
2 – кремниевая центральная пластина (сейсмическая масса);
3 – оксид кремния;
4 – кремниевая нижняя пластина;
5 – стеклянный субстрат;
a – ускорение;
C – измерительные конденсаторы



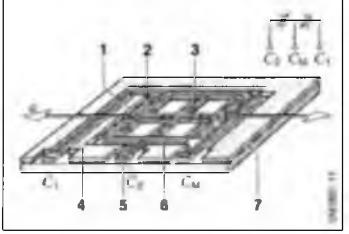
Емкостные датчики оказались особенно эффективны при высокоточных измерениях отклонения инерционной массы. В конструкции используются вспомогательные кремниевые или стеклянные пластины с противоположными электродами выше и ниже подпружиненной инерционной массы. Создается трехслойная конструкция, позволяющая защитить пластины и противоположные электроды от перегрузок. Заполнение герметично запаянной колебательной системы датчика точно отмеренным количеством воздуха – очень компактная, недорогая форма амортизации, которая также отличается низкой температурной чувствительностью. В существующих конструкциях для непосредственного соединения трех кремниевых пластин почти всегда используется процесс плавления. Ввиду разного теплового расширения у различных компонентов, их необходимо устанавливать на кассетную подложку. Это имеет решающее значение для точности измерений. Используется практически прямолинейный монтаж со свободной поддержкой в чувствительном диапазоне.

Датчики этого типа в основном используются для определения ускорений низкого уровня (< 2 g) и имеют двухпластинчатую конструкцию (пластина датчика + пластина CMOS со встроенной защитной функцией). Переход к расширенной оценке сигнала приводит к автоматическому возврату сейсмической массы в нулевое положение, при этом активирующий сигнал используется как выходная величина.

Ныне также используются поверхностно-микромеханические датчики гораздо меньшего размера (типичная длина края – 100–500 мкм), изначально их использовали для больших ускорений (50–100 g, в системах защиты пассажиров), но затем стали использовать и для меньших ускорений. Для построения пружинно-массовой системы на поверхности кремниевой пластины используется аддитивный способ печати (рис. 5).

Главным отличием этих датчиков от объемных кремниевых элементов является типичная емкость порядка 1 пФ (прежние имели 10–20 пФ). Поэтому оценочная электроника встраивается на одну пластину вместе с датчиком или очень близко к ней на той же подложке или рамке. Возможны также системы с электростатической обратной связью с управлением по положению.

Рис. 5 Датчик ускорения, поверхностно-микромеханический с емкостным отводом:
1 – сейсмомасса с пружинным креплением с электродами, 2 – пружина, 3 – фиксированные электроды с емкостью C_1, 4 – печатный Al проводник, 5 – контактная площадка; 6 – фиксированные электроды емкостью C_2; 7 – оксид кремния; α – ускорорение в направлении зондирования, $C_м$ – измерительный конденсатор



Для больших ускорений (в системах защиты пассажиров) используются микромеханические поверхностные датчики значительно меньших размеров (типичные значения длины находятся в пределах 100 мкм). Для построения пружинно-массовой системы на поверхности кремниевой пластинки используется аддитивный способ печати.

Датчики давления

Косвенно измеряемые переменные

Измеряемое давление определяется как ненаправленная сила, действующая во всех направлениях в газах и жидкостях. Оно очень хорошо распространяется в гелеобразных веществах и мягких герметизирующих составах, используемых время от времени для разных целей.

Для измерения давления здесь также используются динамически и статически действующие датчики. До сих пор в автомобилях использовались практически только статические датчики давления. Важнейшие объекты измерения:

- давление во впускном трубопроводе и давление наддува (1–5 бар);
- давление в электропневматических тормозах (10 бар);
- давление воздуха в подвеске (16 бар);
- давление в шинах (5 бар, абсолютное) для контроля давления в шинах;
- давление в гидроаккумуляторе (около 200 бар) системы ABS, усилителя руля;
- давление в амортизаторах (200 бар) для систем управления подвеской;
- давление хладагента (35 бар) системы кондиционирования воздуха;
- управляющее давление (35 бар) в автоматической трансмиссии;
- давление в главном и колесном тормозных цилиндрах (200 бар);
- избыточное и вакуумное давление в топливном баке (0,5 бар);
- давление в камере сгорания (100 бар, динамическое) для определения перебоев зажигания и детонации;
- секционное давление впрыска в дизеле (1000 бар, динамическое) для регулирования;
- давление в магистрали, общая дизельная магистраль (1800 бар);
- давление в магистрали, прямой впрыск бензина (200 бар).

Принципы измерения

Измерение давления осуществляется непосредственно путем отклонения диафрагмы или датчиком усилия.

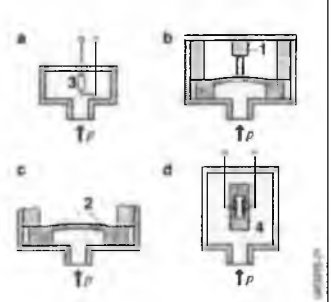
Прямое измерение давления

Поскольку все резисторы более или менее зависят от давления (волюметрический эффект), при необходимости измерения очень больших давлений (>10^4 бар) теоретически было бы достаточно просто ввести электрический резистор в находящуюся под давлением среду. С другой стороны, резисторы в то же время более или менее зависят от температуры, а эту характеристику обычно очень сложно подавить. Кроме того, представляет сложности герметичный вывод их соединений из напорной среды. Капсулированные емкостные измерительные модули имеют более благоприятные характеристики и их проще изготавливать.

Емкостные датчики давления

Однако емкостные датчики давления, в отличие от инерционных (см. «Ускорение, скорость вращения вокруг вертикальной оси»), используются удивительно редко, хотя могли бы иметь похожие преимущества (особенно в плане точности). Это связано с одним важным отличием от других упомянутых датчиков, а именно с тем, что датчики давления должны

Рис. 1. Измерение давления:
a – прямое, через чувствительный к давлению резистор (3); b – с датчиком силы (1); c – через деформацию диафрагмы с помощью тензометрического резистора (2); d – емкостное через деформацию ячейки диафрагмы (4); p – давление



находиться в непосредственном контакте с измеряемой средой. Ее диэлектрические свойства практически всегда влияют на калибровку таких емкостных датчиков. Это значит, что калибровка в этом случае не только будет зависеть от среды, но и станет невозможной без нее (т.е. в «сухом» состоянии). Четкого разделения на сегодняшний момент удалось добиться только за счет значительных технических затрат.

Диафрагменные датчики

В наиболее распространенном методе измерения давления (также и в автомобилестроении) в качестве промежуточной ступени используется тонкая диафрагма. Измеряемое давление сначала воздействует на одну сторону этой диафрагмы, изгибая ее в большей или меньшей степени. В очень широком диапазоне ее диаметр и толщину можно адаптировать к конкретному диапазону давления. При измерении низкого давления используются большие диафрагмы, способные легко деформироваться на 0,1–1 мм. Для высокого давления требуются диафрагмы большей толщины и меньшего диаметра, деформирующиеся только на несколько мкм. Если при низком давлении можно рассматривать также датчики для измерения зазоров и расстояний, то в диапазонах среднего и высокого давления доминируют методы измерения напряжения. Здесь используются практически только тензометрические технологии (тензометрические резисторы).

Строго говоря, деформация диафрагмы зависит от разности давления, воздействующего на ее верхнюю и нижнюю стороны. Соответственно, существует четыре основных типов датчиков давления:

- датчик абсолютного давления;
- датчик опорного давления;
- датчик барометрического давления;
- датчик дифференциального давления.

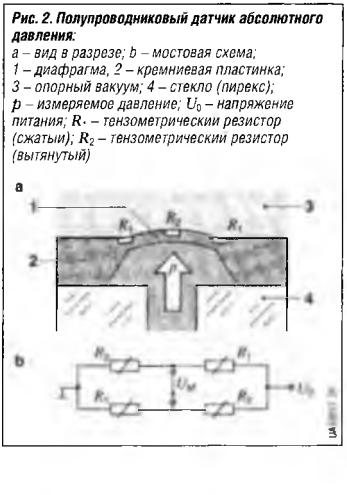
Применение

Полупроводниковые датчики давления

Содержат кремниевую диафрагму с чувствительными к давлению резисторами. Коэффициент K (относительное изменение сопротивления резистора вследствии деформации) у резисторов, вплавленных в монокристаллический кремний, особенно высок. Обычно $K = 100$. До сих пор датчик и гибридная цепь для обработки сигнала размещались в одном корпусе. Компенсационная и калибровочная настройки датчика могут осуществляться непрерывно или постадийно схемой, интегрированной в отдельный вспомогательный кристалл или в кристалл датчика. В будущем значения поправок к данным и величинам будут храниться в цифровом виде в программируемой памяти (PROM).

Датчики, интегрированные в одном кристалле с полной электронной калибровкой, наиболее подходят для измерения нагрузок в электронных системах зажигания и впрыска топлива дизельных двигателей. Благодаря компактности, они могут устанавливаться непосредственно во впускном трубопроводе (более ранние конструкции устанавливались в соответствующих электронных блоках управления (ЭБУ)), или в моторном отсеке. Часто используются «обратно собранные» конструкции, в которых измеряемое давление подводится к электронно-пассивной полости на боковой стороне кристалла датчика (рис. 3). Для максимальной защиты более чувствительная сторона кристалла с печатными схемами и контактами помещается в оболочку камеры эталонного давления, расположенную между основанием корпуса и припаянным металлическим колпаком. Однако более дешевым решением является приклеивание заключенной в вакуум пластинки датчика на кремниевый блок, где чувствительная сторона пластинки просто защищается от напорной среды подходящим гелем (рис. 3, b).

Рис. 2. Полупроводниковый датчик абсолютного давления:
a – вид в разрезе; b – мостовая схема; 1 – диафрагма, 2 – кремниевая пластинка; 3 – опорный вакуум; 4 – стекло (пирекс); p – измеряемое давление; U_0 – напряжение питания; R_1 – тензометрический резистор (сжатый); R_2 – тензометрический резистор (вытянутый)



Такие датчики пригодны также для применения в системах контроля давления в шинах для его непрерывных и бесконтактных измерений. Практически идентичную пластинку датчика можно также использовать в качестве датчика давления в камере сгорания (рис. 4). Условие – кремниевая пластинка не должна непосредственно подвергаться воздействию высокой температуры (не более 600 °С). Металлическая изолирующая диафрагма и наплавленный передаточный стержень, длиной несколько миллиметров, обеспечивают необходимую защиту. С помощью микромеханических методов изготавливается миниатюрная проставка в центре диафрагмы, передающая усилие тензодатчику. Измеряемое усилие передается стержнем в переднюю часть диафрагмы через проставку и далее в кристалл датчика с минимальным искажением. Такой метод установки позволяет поддерживать рабочие температуры ниже 150°С.

Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики обеспечивают динамическое измерение давления. В электронноуправляемых дизельных топливных насосах высокого давления для определения начала и конца впрыска (подачи топлива) датчиком регистрируются только изменения давления в секции насоса. Тонкая промежуточная диафрагма используется для прямой или косвенной передачи давления на цилиндрический или прямоугольный пьезокерамический элемент. Поскольку здесь особой точности не требуется, погрешностями от гистерезиса, старения и тепловыми прене-

Рис. 3& Датчик абсолютного давления:
*а – обратная сборка (опорный вакуум на структурной стороне); b – упрощенная сборка с защитным гелем; с – «внешнее пакетирование» для установки во впускном трубопроводе со встроенным датчиком температуры воздуха; 1,3 – электрические соединения с вводом в стеклянной оболочке; 2 – опорный вакуум; 4 – измерительная ячейка (чип) с оценочной электроникой; 5 – стеклянное основание; 6 – колпачок; 7 – питание для измеряемого давления **p**; 8 – защитный гель; 9 – гелевая рамка; 10 – керамический гибрид; 11 – камера с опорным вакуумом; 12 – склеиваемое соединение; 13 – стенка впускного трубопровода; 14 – корпус, 15 – уплотнительное кольцо; 16 – датчик температуры; 17 – вывод, 18 – крышка корпуса; 19 – измерительная ячейка; **p** – измеряемое давление*

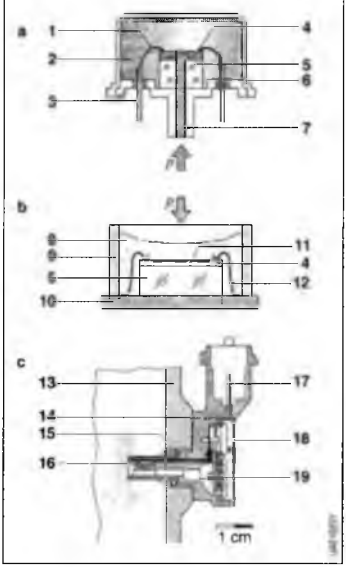
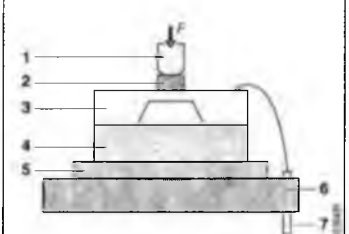


Рис. 4 Интегральный кремниевый датчик давления в камере сгорания:
1 – передающий силу стержень;
2 – кремниевое основание (ввод силы);
3 – встроенный кремниевый датчик давления;
4 – пирекс; 5 – керамическая субпластина;
*6 – стальное основание, 7 – вывод; **F** – сила давления в камере сгорания*



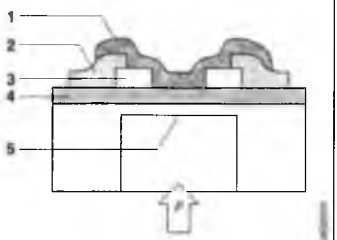
брегают. Предварительный усилитель с высоким сопротивлением на выходе часто устанавливается в герметизированном корпусе. Это позволяет уменьшить влияние источника сигнала на работу датчика для предупреждения частичного шунтирования и появления ошибок в измерениях.

Датчики высокого давления с металлической диафрагмой

Предназначены для работы в условиях чрезвычайно высоких давлений, например, в напорных магистралях впрыска в дизельных системах «Common Rail» для управления изолированной системой. Здесь диафрагмы из высококачественной пружинной стали с тензометрическим выводом обеспечивают гораздо лучшие характеристики, чем системы, предназначенные для контроля давления во впускных трубопроводах. Такие датчики:

- имеют простую и недорогую систему изоляции среды измерения;
- отличаются от кремниевых датчиков большей стойкостью к разрыву в области эффективного диапазона;
- легко устанавливаются в металлические корпусы.

Рис. 6. Датчик высокого давления с металлической диафрагмой, измерительный элемент:
1 – пассивация $SiNx$; 2 – золотой контакт; 3 – поликремниевый тензометр; 4 – изоляция из SiO_2; 5 – стальная диафрагма; p – давление



Устройства, содержащие изолированный напыленный (осажденный из паровой фазы) металлический тонкопленочный тензометр (K = 2) и поликремниевый тензометр (K = 40), представляют собой долговечные высокоточные датчики (рис. 6). Элементы усиления, калибровки и компенсации могут сочетаться с микросхемой ASIC, установленной в корпусе датчика с необходимым экранированием электромагнитных воздействий (рис. 7).

Рис. 5. Пьезоэлектрический датчик давления:
1 – металлическое покрытие; 2 – пьезоэлектрический диск; 3 – изоляция; 4 – корпус; p – давление; U_h – напряжение измерения

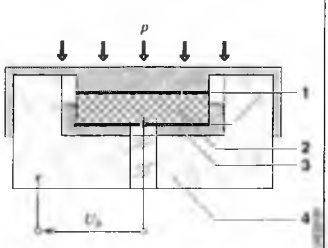
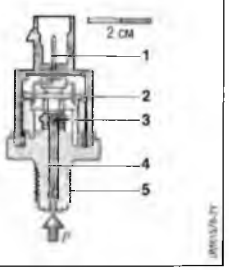


Рис. 7. Датчик высокого давления с металлической диафрагмой, конструкция:
1 – вывод; 2 – ASIC; 3 – чувствительный элемент; 4 – питающий канал; 5 – соединитель



Расходомеры

Расход жидкостей в автомобилях

Поскольку расход топлива уже доступен в виде вычисляемой измеряемой переменной в электронно управляемых измерительных системах, в основном используемых сегодня в двигателях внутреннего сгорания, нет нужды измерять его для управления процессом сгорания.

Расход воздуха во впускном трубопроводе двигателя и в тракте наддува

Соотношение масс воздуха и топлива является важнейшим фактором в химическом процессе сгорания, поэтому фактически производится измерение массы расходуемого воздуха, хотя может применяться процедура, использующая определение объема и динамического давления. Максимальный измеряемый массовый расход воздуха находится в диапазоне 400–1200 кг/ч, в зависимости от мощности двигателя. По усредненной оценке работы на холостом ходу современных двигателей отношение между минимальным и максимальным расходом составляет от 1:90 до 1:100. Из-за строгих требований к составу выхлопа и расходу необходимо обеспечивать уровень точности 1–2 % от измеренного значения. Применительно к диапазону измерения это может означать точность измерения 10^{-4}, необычайно высокую для автомобилей.

Воздух же всасывается двигателем не постоянно, а в момент открывания впускных клапанов. По этой причине расход воздуха, особенно при широко открытой дроссельной заслонке, сильно колеблется в точке измерения, которая всегда расположена во впускном трубопроводе между воздушным фильтром и дроссельной заслонкой. Из-за резонансов впускного трубопровода пульсация в нем (прежде всего в 4-цилиндровых двигателях, где индукционные или нагнетальные фазы не перекрываются) настолько сильна, что даже возникают кратковременные обратные потоки. Их необходимо обнаруживать точным расходомером.

Измерение расхода

Среда с однородной плотностью ρ протекает через трубопровод постоянной площадью поперечного сечения A со скоростью, которая, в основном, является постоянной во всех точках поперечного сечения трубы (турбулентный поток). Результирующие условия определяются как:

объемный расход $Q_V = v \cdot A$

и

массовый расход $Q_M = \rho \, v \cdot A$.

Если в трубопроводе установить измерительную шайбу, сжимающую поток, то, в соответствии с уравнением Бернулли, возникает перепад давления Δp, связывающий массу и объем расхода:

$\Delta p = \text{const} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{const} \cdot Q_V \cdot Q_M$.

Измерительные шайбы позволяют отслеживать расход в относительном диапазоне 1:10; шайбы переменного сечения позволяют это делать в значительно большем диапазоне соотношений.

Рис. 1. Пульсация всасываемого воздуха, 4-цилиндровый бензиновый двигатель:
Рабочая точка. n = 3000 мин$^{-1}$, давление во впускном трубопроводе p_L = 0,96 бар (полная нагрузка), средний расход воздуха Q_L = 130,89 м^3/ч

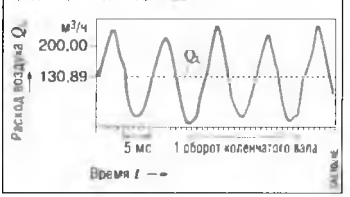
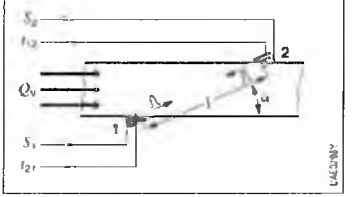


Рис. 2. Ультразвуковое измерение расхода воздуха:
1,2 – передатчик/приемник 1 и 2, l – путь измерения; S – команда передачи; t – транзитный период; Q_v – объемный расход воздуха; α – угол



Объемные расходомеры

В соответствии с принципом траектории вихря Кармана, завихрения воздушного потока периодично появляются позади препятствия на постоянном расстоянии. На периферии (стенки трубы или канала) частота завихрений пропорциональна расходу:

$$f = 1/T = \text{const} \cdot Q_V.$$

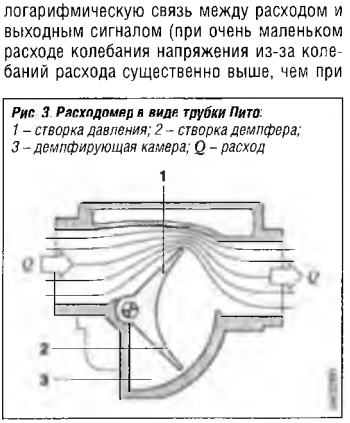
Недостаток: пульсация потока может быть результатом ошибок измерения.

Ультразвуковая процедура измерения расхода может быть использована для определения времени t прохождения акустической волны через измеряемую среду, например, воздух, под углом α (рис. 2). Одно измерение выполняется навстречу потоку, второе – по направлению потока на одном и том же участке длиной l. Разница между отрезками времени прохождения пропорциональна объемному расходу.

Расходомеры в виде трубок Пито

Вращающаяся створка поворачивается на определенный угол в зависимости от расхода на участке переменного сечения, размер которого зависит от расхода. С помощью потенциометра можно контролировать положение створки для определения соответствующего расхода. Физическое и электрическое устройство расходомера, например, для системы L-Jetronic, должно обеспечивать логарифмическую связь между расходом и выходным сигналом (при очень маленьком расходе колебания напряжения из-за колебаний расхода существенно выше, чем при большом расходе). Другие типы автомобильных расходомеров воздуха рассчитаны на линейную характеристику (KE-Jetronic). Ошибки при измерениях возникают, когда инерция клапана не позволяет ему отслеживать пульсации воздушного потока в условиях полной нагрузки при высокой частоте вращения коленчатого вала.

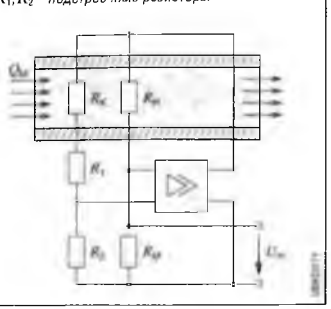
Рис. 3. Расходомер в виде трубки Пито:
1 – створка давления; 2 – створка демпфера; 3 – демпфирующая камера; Q – расход



Датчики массового расхода воздуха

Датчики массового расхода воздуха работают по принципу проволочных или пленочных термоанемометров; они не содержат движущихся механических деталей. Замкнутая цепь управления в корпусе датчика поддерживает постоянную разность температур между тонкой платиновой нитью или тонкопленочным резистором и проходящим воздушным потоком. Ток, необходимый для поддерживания этой разницы, обеспечивает довольно точный, хотя и нелинейный, показатель массового расхода воздуха. ЭБУ системы преобразует сигналы в линейные и выполняет другие задачи по обработке сигнала. Ввиду замкнутой конструкции, этот тип расходомера воздуха позволяет отслеживать колебания расхода в миллисекундном диапазоне. Однако неспособность датчика распознавать направление потока может привести к незначительной ошибке в измерении, если во впускном трубопроводе возникает сильная пульсация.

Рис. 4. Электронное управление проволочным термоанемометром:
Q_M – массовый расход воздуха;
U_m – напряжение измерения;
R_H – горячая проволока;
R_K – компенсаторный резистор;
R_M – измерительный резистор;
R_1, R_2 – подстроечные резисторы



Платиновая проволока в проволочном термоанемометре (HLM) работает и как нагревательный элемент, и как датчик температуры нагревательного элемента. Для получения стабильных и надежных характеристик в течение длительной эксплуатации после каждой фазы активной работы (когда зажигание отключено) с поверхности нагретой (приблизительно до 1000 °C) проволочной нити должны испаряться все накапливаемые отложения (послесвечение).

В первом пленочном термоанемометре, все еще изготавливаемом по толстопленочной технологии (HFM2), все измерительные элементы и управляющая электроника размещаются на одной подложке. В этом варианте нагревательный резистор размещается на задней стороне пластинки-основания, а соответствующий датчик температуры – спереди. Это ведет к некоторому запаздыванию срабатывания конструкции. Для уменьшения влияния нагревательного элемента на параметры резистора температурной компенсации (R_K), в керамической подложке делают лазерный срез. Для улучшения характеристик используется послесвечение нагревательного элемента.

Исключительно компактные пленочные термоанемометры (HFM5, HFM6) также работают по принципу нагрева. Здесь нагревательный и измерительный резисторы имеют вид тонких слоев платины, осажденной из паровой фазы на кремниевую пластинку, служащую подложкой. Температурная изоляция монтажа достигается установкой кристалла кремния на микромеханически утонченную подложку (подобная концепция используется в диафрагменных датчиках давления). Смежно расположенные датчик температуры подогревателя S_H и датчик температуры воздуха S_L (на более толстом краю кремниевого кристалла) поддерживают нагревательный резистор H на постоянном уровне превышения температуры. Этот метод отличается от ранее использовавшихся тем, что для получения выходного сигнала не требуется измерять ток подогрева. Вместо этого сигнал выводится из разности температур среды (воздуха), замеряемых датчиками S_1 и S_2. Они расположены на пути потока, по ходу его движения и навстречу ему, по обе стороны от нагревательного резистора. Хотя (как и при прежней технологии) характеристика

Рис. 5. Микромеханический пленочный термоанемометр:
1 – диэлектрическая диафрагма;
H – нагревательный резистор;
S_H – датчик температуры нагревателя;
S_L – датчик температуры воздуха;
S_1, S_2 – датчики температуры (до и после);
Q_M – массовый расход; s – точка измерения;
T – температура

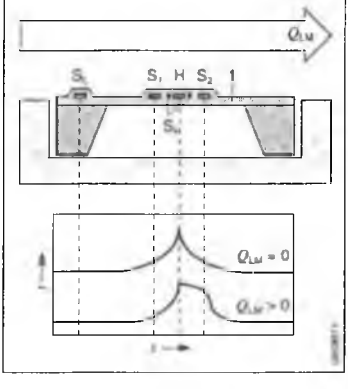
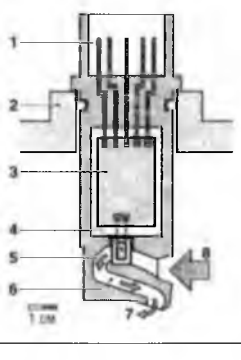


Рис. 6. Пленочный термоанемометр HFM5 / HFM6:
1 – электрические соединения; 2 – стенка измерительной трубки или корпуса воздушного фильтра; 3 – оценочная электроника (гибридная цепь); 4 – измерительная ячейка; 5 – корпус датчика; 6 – тракт измерения частичного расхода; 7 – выпуск, частичный расход воздуха Q_M. 8 – впуск, частичный расход воздуха Q_M



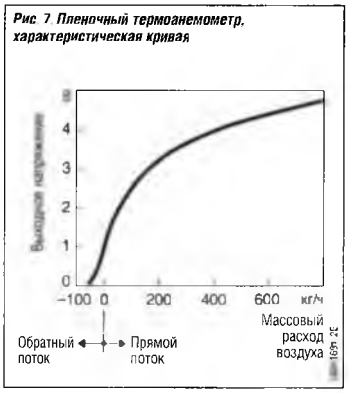


Рис. 7 Пленочный термоанемометр, характеристическая кривая

реакции остается нелинейной, тот факт, что начальное значение также указывает направление потока, является улучшением по сравнению с прежним методом, где использовался нагревающий ток.

Из-за маленького размера измерительного элемента этот расходомер является неполнопоточным, поскольку определяет лишь определенную, очень маленькую часть общего расхода. Постоянство и воспроизводимость коэффициента деления имеют большое влияние на точность измерения. Однако, поскольку он имеет конструкцию вставного датчика, то в окончательном анализе его калибровка и точность определяются только с привязкой к трубке Вентури или поточному тракту. Впуск и выпуск микромеханического измерительного элемента конструируются и оптимизируются таким образом, чтобы более тяжелые частицы, такие как частицы пыли и капельки жидкости, не приближались непосредственно к измерительному элементу, а отводились в сторону от него.

В HFM6 используется такой же элемент, как и в HFM5 при той же базовой конструкции. Ключевых различий два:

- встроенная оценивающая электроника работает в цифровом режиме для получения более высокой точности измерения;
- конструкция канала для измерения частичного потока изменена для обеспечения защиты от загрязнения непосредственно перед чувствительным элементом.

Газовые датчики, датчики концентрации

Измеряемые переменные и принципы измерения

Концентрация газовой среды определяет массовую или объемную долю данного материала в другой среде или смеси или в сочетании с другими материалами. В случае с датчиком концентрации важно, чтобы в идеальном случае он был чувствителен только к одной среде и в то же время практически «игнорировал» все другие среды. Конечно, на практике любой датчик концентрации имеет собственную перекрестную чувствительность к другим средам, хотя, как это часто бывает, «температура» и «давление» поддерживаются постоянными. Кроме того, эти датчики, как правило незащищенные от посторонних веществ, рискуют получить необратимые повреждения («отравление» датчика). Например, электролитические датчики концентрации кислорода («лямбда-зонды») выходят из строя под воздействием свинца, который может содержаться в отработавших газах.

В автомобиле необходимо измерять следующие переменные:

- содержание кислорода в выхлопе (управление сгоранием с обратной связью, контроль каталитического нейтрализатора);
- содержание CO и NO_x, а также влажность воздуха внутри автомобиля (качество воздуха, запотевание стекол);
- Влажность в тормозной пневмосистеме (контроль воздухоосушителя);
- влажность наружного воздуха (предупреждение о гололеде).

Уже давно преследуется цель измерения концентрации сажи в выхлопе, особенно у дизельных двигателей. Эта задача усложняется тем, что датчик может засориться частицами сажи до такой степени, что перестанет работать.

Появление топливных элементов в качестве как автомобильной системы привода означает необходимость разработки новых газовых датчиков, например, для обнаружения водорода.

Применение

Датчик концентрации кислорода (лямбда-зонд)

В системах дозирования топлива содержание остаточного кислорода в отработавших газах, измеренное датчиком O_2, используется для точного контроля сгорания топливовоздушной смеси. Состав смеси регулируется довольно точно для достижения коэффициента избытка воздуха $\lambda = 1$ (стехиометрическая смесь). Твердый электролит из керамического материала ZrO становится электрически проводимым для ионов кислорода при высоких температурах (> 300 °C). На контактах датчика, выполненных в виде пористых платиновых толстопленочных электродов, покрытых слоем керамической шпинели, генерируется гальванический заряд U_S. Этот заряд также называют напряжением Нернста (см. «Электрохимия»):

$$U_s = \frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln \frac{p_{O_2}''}{p_{O_2}'}$$

p_{O_2} – парциальное давление кислорода;
R – газовая постоянная;
T – абсолютная температура;
F – постоянная Фарадея.

Напряжение сильнее всего меняется при $\lambda = 1$. Электрически подогреваемые датчики особенно удобны для измерений параметров двигателя, работающего на обедненной топливной смеси. Они работоспособны и во время прогрева двигателя.

Описанный датчик кислорода, называемый также ячейкой Нернста, может работать и в обратном режиме, как «насос»; т.е. при подаче на него напряжения он транспортирует ионы кислорода в направлении падения напряжения (см. «Широкополосный датчик LSU»). Даже генерируемый предельный ток характеристически зависит от парциального давления p_{O_2}' и p_{O_2}'' на концах датчика.

Лямбда-зонды изготавливаются не только в пальчиковом дизайне, но и в форме с многослойных керамических пластинок с прямоугольными профилями. Корпус и контакты должны выдерживать даже самые большие температуры отработавших газов (≈ 1000 °C) в течение достаточно длительного времени.

Рис. 1. Кривая напряжения двухступенчатого лямбда-зонда для различных рабочих температур

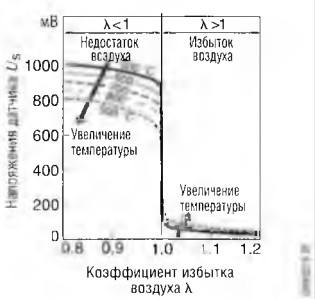


Рис. 2. Лямбда-зонд (пальчиковый) в выхлопной трубе:
1 – керамический элемент датчика, 2 – электроды, 3 – выводы, 4 – контакт корпуса, 5 – выхлопная труба; 6 – керамический защитный слой (пористый); 7 – отработавшие газы; 8 – наружный воздух, u_s – напряжение датчика

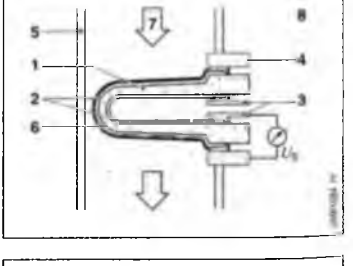
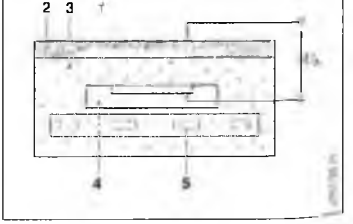


Рис. 3. Плоский лямбда-зонд:
1 – отработавшие газы; 2 – пористый керамический защитный слой, 3 – измерительная ячейка с микропористым покрытием из благородного металла; 4 – тракт эталонного воздуха; 5 – нагреватель, U_A – выходное напряжение



Для обедненных рабочих смесей используются «пластинчатые» датчики меньшего размера с многослойной керамической конструкцией (широкодиапазонные «лямбда-зонды»); такой датчик может использоваться как в бензиновых, так и дизельных двигателях. Как правило, он представляет собой сочетание датчика, работающего как гальванический элемент (датчик Нернста), и электролизера с прокачкой электролита (элемента накачки). Напряжение к элементу накачки, который конструктивно не отличается от стандартного элемента концентрации кислорода, подается от внешнего источника. Если напряжение является достаточно высоким, устанавливается «предельный электрический ток», пропорциональный разности концентрации кислорода на обоих концах датчика. Ионы кислорода – в зависимости от полярности – переносятся током. Элемент накачки постоянно подпитывает датчик концентрации через очень узкий диффузионный промежуток с точно достаточным количеством кислорода из выхлопа, чтобы поддерживать уровень $\lambda = 1$ в датчике. То есть, кислород откачивается в случае избытка воздуха в отработавших газах (обедненный диапазон); в случае низкого остаточного количества кислорода в отработавшем газе (обогащенный режим) кислород накачивается посредством реверсирования напряжения накачки. Соответствующая токовая накачка формирует выходной сигнал.

Датчик качества воздуха

Датчики, особенно реагирующие на токсичные компоненты выхлопа – CO (в основном, у двигателей с искровым зажиганием) и NO_x (в основном, у дизельных двигателей), постоянно проверяют качество воздуха на впуске системы вентиляции. Если концентрация токсичных газов слишком высока, то ЭБУ качества воздуха закрывает заслонки свежего воздуха, предотвращая преждевременное утомление водителя из-за вдыхания этих газов, концентрация которых время от времени может в 100 раз превышать концентрацию в чистом воздухе. Здесь датчик CO измеряет концентрации в диапазоне 10–100 ppm (частей на миллион, или 10^{-6}), а датчик NO_x – в диапазоне 0,5–5 ppm. Срок службы фильтров с активированным углем увеличивается путем уменьшения количества этих загрязняющих веществ.

Эти датчики выполняются в виде толстопленочных резисторов, содержащих оксид олова, на котором могут обратимо откладываться измеряемые вещества. Здесь они иногда очень сильно изменяют свое электрическое сопротивление в широком диапазоне (например, 1–100 кОм). Датчики-резисторы размещаются на общей керамической подложке, нагреваемой с обратной стороны нагревательным проводником до рабочей температуры порядка 330 °C.

Рис. 4. Широкополосный лямбда-зонд:
1 – концентрационная ячейка Нернста;
2 – ячейка кислородного насоса, 3 – диффузионный зазор, 4 – тракт эталонного воздуха; 5 – нагреватель, 6 – контур управления.
I_P – ток насоса, U_H – напряжение нагрева, U_{ref} – опорное напряжение

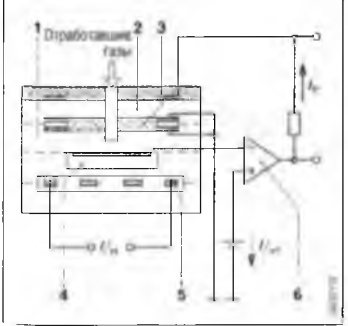
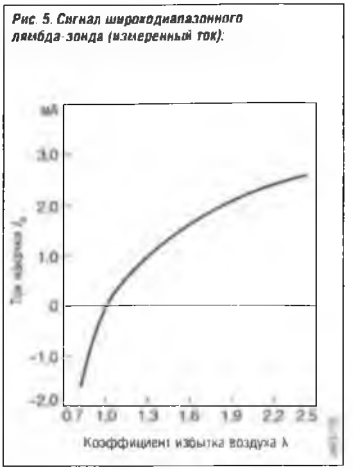


Рис. 5. Сигнал широкодиапазонного лямбда-зонда (измеренный ток):



У более новых ЭБУ качества воздуха также имеется датчик влажности, сигнал которого можно использовать в сочетании с внутренней температурой, измеряемой другими средствами для вычисления точки росы (запотевание стекол автомобиля).

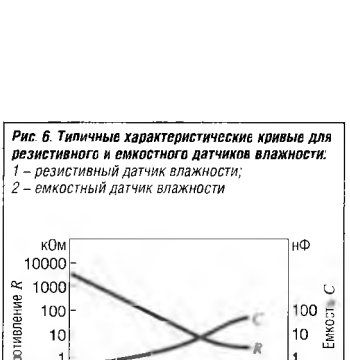
Измерение влажности

Влажность в широком смысле показывает содержание воды в газах, жидкостях и твердых веществах; однако здесь это понятие используется в более узком смысле для обозначения содержания газообразной воды (водяного пара) в газах – предпочтительно в воздухе.

Для определения относительной влажности, в основном, используются емкостные и резистивные датчики. Датчик этого типа состоит из тонкопленочного полимера с металлическим покрытием на обеих сторонах. Емкость этого конденсатора значительно уменьшается по мере адсорбции воды. Постоянная времени обычно составляет приблизительно 30 с. Точка росы может быть также определена путем дополнительного измерения температуры воздуха.

При установке, например в ECU качества воздуха, датчик от вредных примесей защищает тефлоновая диафрагма.

Рис. 6. Типичные характеристические кривые для резистивного и емкостного датчиков влажности:
1 – резистивный датчик влажности;
2 – емкостный датчик влажности



Датчики температуры

Косвенно измеряемые переменные

Температура определяется как ненаправленный параметр, характеризующий энергетическое состояние данной среды, которое может зависеть от времени и местоположения.

$T = T(x, y, z, t)$,

где x, y, z – пространственные координаты; t – время; T – температура, измеряется по шкале Цельсия или Кельвина.

В случае газообразной и жидкой сред обычно можно измерять температуру во всех точках без каких-либо проблем; в случае с твердыми веществами измерение обычно ограничивается поверхностью. Чаще всего используемые датчики температуры должны иметь непосредственный, тесный контакт с измеряемой средой (контактный термометр), чтобы они могли как можно точнее принимать температуру среды; однако для особых случаев используются бесконтактные датчики температуры, определяющие температуру тела или среды на основании испускаемого ими теплового (инфракрасного) излучения (радиационный пирометр, тепловая камера).

Измерение температуры в различных узлах автомобиля проводится почти исключительно терморезисторами в качестве контактных термометров с положительными (PTC) и отрицательными (NTC) температурными коэффициентами. Преобразование изменений сопротивления в аналоговое напряжение выполняется, главным образом, с помощью дополнительных температурно-нейтральных или обратно чувствительных резисторов в качестве делителей напряжения (также улучшающих линейность). Бесконтактное определение температуры в последнее время внедряется в некоторых областях применения в автомобиле, например, для создания оптимального климата (измерение температуры лица водителя) и предотвращения запотевания стекол. Внедрение таких измерений стало экономически себя оправдывать в результате применения технологий микросистем.

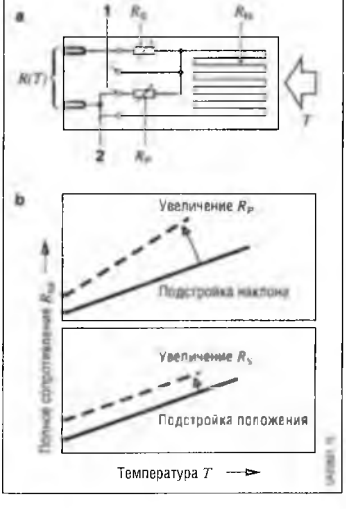
Измерение температуры выполняется в автомобиле для областей применения, сильно различающихся в плане точности и допустимого времени измерения (табл. 1).

Таблица 1. Диапазоны температур в автомобилях

Область измерения	Диапазон в °C
Всасываемый и наддувочный воздух	–40...170
Внешняя атмосфера	–40...60
Салон	–20...85
Вентиляция и отопление	–20...60
Испаритель (кондиционера)	–10...50
Охлаждающая жидкость	–40...130
Моторное масло	–40...170
Аккумуляторная батарея	–40...100
Топливо	–40...120
Воздух в шинах	–40...120
Выбросы отработавших газов	100...1000
Суппорты тормозов	–40...2000

Во многих системах и узлах температура контролируется как второстепенный параметр, особенно в тех случаях, когда перепады температуры вызывают неисправность или оказывают нежелательное влияние на работу всей системы.

Рис. 1. Металлопленочный терморезистор: *a – конструкция, b – корректировка кривой; 1 – вспомогательные контакты; 2 – мост; R_{Ni} – резистор с никелевой пленкой; R(T) – резистор, приведенный к температуре T; R_P, R_S – подстроечные термисторы*



Конструктивные особенности

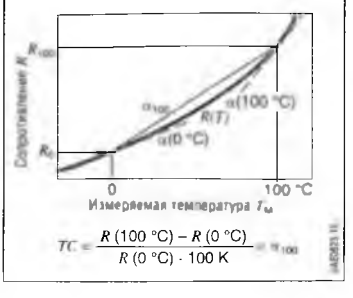
Спеченные керамические резисторы (NTC)

Спеченные керамические резисторы (резисторы NTC) изготавливаются из оксидов тяжелых металлов и оксидированных смешанных кристаллов (спекаются в гранулу или пластинку) и относятся к полупроводниковым материалам с обратно-экспоненциальной температурной характеристикой. Высокая термочувствительность означает, что области применения ограничены диапазоном около 200 K; однако этот диапазон можно определить в пределах от – 40 °C до примерно 850 °C. Более близкие допуски возможны только путем считывания, что сказывается на стоимости.

Тонкопленочные металлические резисторы (PTC)

Тонкопленочные металлические резисторы, объединенные на одной пластине-подложке с двумя дополнительными температурно-нейтральными подстроечными резисторами, обладают большим сроком службы и высокой точностью, поскольку после изготовления могут «настраиваться» лазерами на нужную характеристику с минимальными допусками. Послойная технология позволяет применять керамику, стекло, пластиковую пленку в качестве основного материала и пластик, краску, уплотнительную фольгу, стекло, керамику – в качестве покрытия. Металлические пленки менее чувствительны к изменениям темпе-

Рис. 2. Определение среднего температурного коэффициента TC = α_{100}



ратуры, чем керамико-оксидные полупроводниковые датчики, однако имеют другие преимущества – линейность характеристики, стабильность результатов,

Таблица 2. Температурный коэффициент некоторых материалов датчиков

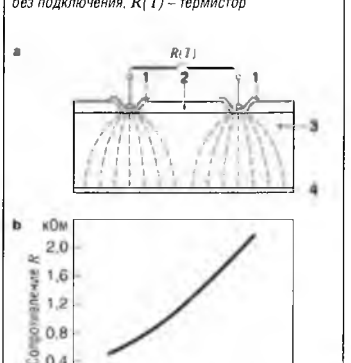
Материал датчика	Температурный коэффициент TC	Диапазон измеряемых температур PTC
Ni	5,1 10^{-3}/K	–60 320 °C
Cu	4,1 10^{-3}/K	–50. 200 °C
Pt	3,5 10^{-3}/K	–220 850 °C

где

$$TC = \frac{R(100\,^{\circ}\mathrm{C}) - R(0\,^{\circ}\mathrm{C})}{R(0\,^{\circ}\mathrm{C}) \cdot 100\ \mathrm{K}} = \alpha_{100}$$

Металло-пленочные резисторы обычно изготавливаются и продаются с базовым значением (значением сопротивления при 0 °C) 100 Ом или 1000 Ом (например, под обозначением Pt 100 или Pt 1000).

Рис. 3. Кремниевый полупроводниковый резистор (принцип распределения сопротивления):
a – конструкция; b – характеристическая кривая; 1 – контакты, 2 – пассивация (нитрид, оксид); 3 – кремниевая подложка; 4 – противоэлектрод без подключения, $R(T)$ – термистор



В дополнение к компенсирующим элементам на несущей пластинке можно разместить и другие элементы активных и пассивных цепей для тонкопленочного датчика. Это упрощает первоначальную обработку и преобразование сигнала в точке измерения.

Толстопленочные резисторы (PTC и NTC)
Толстопленочные покрытия с высоким удельным сопротивлением (малой площадью поверхности) и положительными и отрицательными температурными коэффициентами в температурных датчиках используются, главным образом, с целью компенсации. Они имеют нелинейные характеристики (однако, без экстремальной кривизны массивных резисторов NTC) и допускают лазерную подстройку. Эффективность измерения можно повысить, формируя в материалах NTC и PTC цепи делителей напряжения.

Монокристаллические кремниевые полупроводниковые резисторы (PTC)
При производстве применяются монокристаллические полупроводниковые материалы, например, кремний, что позволяет объединить дополнительные активные и пассивные цепи в кристалле датчика. Из-за более плотных допусков, они изготавливаются по принципу объемного (распределенного) сопротивления. Прежде чем попасть в кремниевый материал, электрический ток протекает через измерительный резистор и поверхностно-точечный контакт. Затем ток, широко распространяясь, поступает на противоэлектрод, закрывающий основание пластинки датчика. Как и хорошо воспроизводимые материальные константы, высокая плотность тока после контактной точки (высокая точность достигается путем фотолитографического изготовления) почти исключительно определяет сопротивление датчика.

Чувствительность измерения у такого датчика практически в два раза больше, чем у платинового резистора (TK = 7,73·10 $^{-3}$/K). Однако характеристика менее линейна, чем у металлического датчика. Диапазон измерения ограничен внутренней проводимостью материала примерно до +150 °C

Датчики силы и момента

Косвенно измеряемые переменные

Датчики силы и моменты используются в автомобилях для определения многочисленных переменных:

- сила сцепления между тягачом и прицепом или полуприцепом для регулируемого торможения без воздействия сил (отсутствие сил растяжения и сдвига на сцепке при торможении);
- сила амортизации для электронных систем управления подвеской;
- осевая нагрузка для систем электронного управления распределением тормозного усилия для автомобилей большой грузоподъемности;
- усилие на педали для систем электронно-управляемых тормозных систем;
- тормозное усилие для электронно-управляемых тормозных систем;
- крутящий момент привода и тормозной момент;
- крутящий момент на рулевом колесе или в усилителе рулевого управления;
- защита пальцев пассажиров в стеклоподъемниках и люках с электроприводом;
- силы на колесах;
- вес пассажиров автомобиля (для систем защиты пассажиров).

Во многих случаях начальные разработки не привели к ожидаемым результатам из-за чрезмерных затрат на достижение заявленной точности систем, в которых нужно было устанавливать датчики. Вопреки ожиданиям, оказалось невозможным снизить затраты на производство хороших датчиков крутящего момента ниже уровня затрат на датчики давления и ускорения. На самом деле датчики крутящего момента стоят дороже. Дело усложняется, и это особенно относится к датчикам крутящего момента, когда измеряемый параметр должен передаваться бесконтактными методами с вращающегося вала (например, рулевого или приводного вала) на датчик, установленный на шасси. Токосборные контактные кольца неприемлемы в автомобиле.

Поскольку любая форма измерения лишь части силы и момента очень проблематична и легко может привести к искажению результатов, датчики силы и момента должны непосредственно подключаться к потоку энергии (иными словами, через них должна проходить полная измеряемая переменная). Для этого нужно отсечь компоненты, несущие силу и момент, чтобы можно было установить ранее проверяемые датчики. Это часто приводит к проблемам. Но даже если не нужно отсекать компоненты, несущие силу и момент, а механические элементы используются в качестве измерительных пружин, которые требуют модификации для установки чувствительных элементов, то все равно необходима четкая договоренность с изготовителем этих компонентов.

В силу конструкции размер датчиков силы напрямую зависит от диапазона измерения. Хотя, благодаря запросам автопромышленности, и существуют компактные датчики силы и момента, они обеспечивают достаточную точность измерений только при воздействии сил на датчик точно определенным образом, что обычно имеет место лишь в лабораторных условиях. Допуски и разрегулировка, обычно встречающиеся на практике, диктуют необходимость подключения гомогенизирующих элементов, которые в свою очередь делают датчики слишком большими.

Хотя Bosch в настоящее время практически не производит датчики силы и момента для автопромышленности, ниже приводится краткий обзор важнейших принципов измерения и методов разработки.

Принципы измерения

Говоря о датчиках силы и момента, следует различать статический и динамический принципы измерения, а также принципы измерения, основанные на смещении и механическом напряжении. До сих пор были востребованы, большей частью, статические датчики, при этом для датчиков силы предпочтительными были принципы измерения неупругих нагрузок. В настоящее время для измерения момента на рулевом колесе приемлемы системы с «мягкими» упругими датчиками, которые также могут содержать датчики измерения угла. Это возможно, в частности, потому, что эта характеристика показала себя приемлемой в более ранних гидравлических системах, не имевших датчиков. Для определения силы и крутящего момента, в том числе и в промышленности, чаще всего используются магнитноэффективные катушечные системы.

Однако в последнее время стали использоваться и магнитостатические датчики Холла, измеряющие смещение (например, опреде-

ление веса пассажира), так что здесь можно использовать массово производимые микроструктурированные элементы. Несмотря на общеизвестные проблемы с загрязнением и затраты на установку, рассматриваются также оптоэлектронные датчики (например, для электронных систем усиления рулевого управления), позволяющие определять угол поворота с высоким разрешением одновременно с определением крутящего момента.

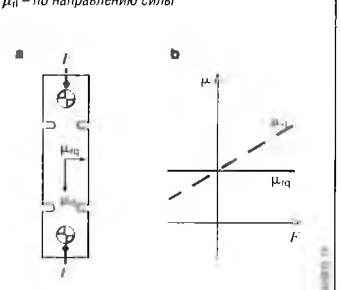
Датчики силы

Датчики измерения механической нагрузки

Магнитоэластичный принцип

Ферромагнитные материалы под влиянием магнитного поля изменяют свою длину в направлении поля (эффект магнитострикции). Обратный эффект – изменение магнитных свойств при растягивании и сжатии – называют магнитоэластичным эффектом. Этот эффект выражается в анизотропическом (направленном) поведении относительной магнитной проницаемости μ_r (отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H). Если она сохраняет одинаковое значение в случае, когда отсутствуют силы во всех направлениях (изотропия), то под воздействием силы F она принимает зависящее от материала значение ($\mu_{r\parallel}$), несколько отличающееся по направлению силы, чем поперек направления силы ($\mu_{r\perp}$) (рис. 1).

Рис. 1. Магнитоэластичный анизотропический эффект:
a – магнитоэластичный чувствительный элемент, b – измерительный эффект, F – сила, μ_r – относительная магнитная проницаемость, $\mu_{r\perp}$ – перпендикулярно направлению силы; $\mu_{r\parallel}$ – по направлению силы



На самом деле изменение магнитной проницаемости по направлению силы истинно отражает знак силы. Несмотря на то, что этот эффект демонстрируют практически все ферромагнитные материалы, его можно оптимизировать путем использования определенного сплава. К сожалению, материалы с хорошей линейностью, низким гистерезисом и низкой температурной чувствительностью не идентичны материалам, имеющим хороший измерительный эффект. Таким образом, эффект для метрологически оптимизированных материалов все еще находится в диапазоне нескольких процентов и требует электронного усиления.

Преимуществом магнитоэластичного эффекта, с одной стороны, является большой диапазон температур (около 300 °C). С другой стороны, это дает выраженный объемный эффект. Это означает, что катушки, используемые для обнаружения изменений, не только регистрируют локальное изменение проницаемости, вызванное воздействием силы (как, например, у тензометрических датчиков), но на показания в большей или меньшей степени влияет на все поперечное сечение катушки. Это делает датчик чуть менее чувствительным к возможности ассиметричного воздействия силы.

Поскольку изменения проницаемости в результате воздействия силы практически всегда регистрируются с помощью переменных полей, то необходимо соблюдать глубину проникновения этих полей, которая очень сильно зависит от частоты. Чтобы максимально использовать измерительный эффект, магнитноактивный воздушный зазор должен быть как можно меньше. Часто это означает, что магнитноактивный измерительный контур замыкается ферромагнитным материалом, даже если он не включен в магнитный поток.

Для использования эффекта напряженность поля H питающей катушки не должна быть параллельна воздействующей силе; под воздействием силы она изменяет не только магнитную индукцию B, но и ее направление (из-за анизотропии проницаемости). Если исходить из того, что при отсутствии силы H и B направлены параллельно, то при воздействии силы и ее возрастании они будут принимать все более разные направления. Это можно использовать как особое преимущество для регулирования индуктивной связи двух катушек, пересекающихся под углом 90° для измерения (рис. 2).

Принцип тензометрического (пьезорезистивного) датчика:
Тензометрические резисторы представляют собой наиболее распространенный и, пожалуй, самый надежный и точный метод измерения силы и момента (рис. 3). Их принцип действия основан на наличии в измеряемой зоне эластичного элемента, к которому применим закон Гука, пропорциональной связи между механическим напряжением в этом элементе σ, вызванным воздействием силы, и возникающей деформацией ε. Согласно закону Гука:

$$\varepsilon = \Delta l/l = \sigma/E,$$

где E – модуль упругости. Поскольку измеряется не непосредственно напряжение в результате воздействия силы, а возникающая деформация, то тензометрический метод можно рассматривать как метод косвенного измерения. Например, при уменьшении модуля эластичности на 3% при температуре более 100 К, что нормально для металлов, сила, выдаваемая тензометрическим методом 3% слишком велика. Тензометрические резисторы соединяются как пленочные резисторы – в отличие от постоянно открытых тензометров – с поверхностью выбранного эластичного элемента таким образом, чтобы они в точности следовали его поверхностной деформации. Изменение сопротивления вследствие деформации резистора определяется коэффициентом K данного резистора (см. «Датчики давления»):

$$\Delta R/R = K \varepsilon$$

У металлооксидных резисторов коэффициент K обычно не превышает 2. Реакция температуры резистора устраняется за счет того, что тензометры обычно крепятся к эластичному элементу полумостом или мостом. Поскольку воздействия температуры приводят к таким же изменениям направления на тензометре, выходной сигнал отсутствует.
Несмотря на высокий уровень точности и надежности, поскольку деформация и, соответственно, изменения сопротивления находятся лишь в процентном диапазоне исходного состояния, тензометрические датчики генерируют выходное напряжение только в милливольтовом диапазоне. Они обычно требуют локального усиления.

Рис. 2. Магнитоэластичный датчик силы растяжения сжатия, работающий по принципу кроссдуктора:
1 – питающая обмотка; 2 – обмотка датчика; 3 – ярмо магнита; 4 – магнитоэластичный чувствительный элемент, 5 – селективный фазовый выпрямитель; F – сила

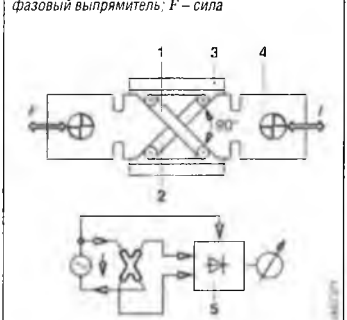
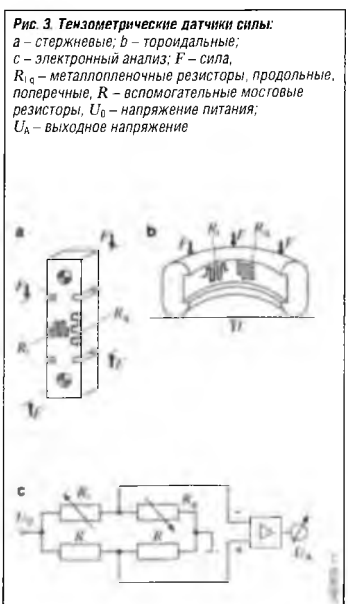


Рис. 3. Тензометрические датчики силы:
a – стержневые; b – тороидальные; c – электронный анализ; F – сила, $R_{t,g}$ – металлопленочные резисторы, продольные, поперечные, R – вспомогательные мостовые резисторы, U_0 – напряжение питания; U_A – выходное напряжение



Области применения

Как правило, чтобы измерить силу, нужно прикрепить очень маленькие тензометрические резисторы к более крупным деталям, на которые воздействует сила, или эластичным элементам. Традиционный пленочный способ крепления тензометрических резисторов к эластичному элементу (применяется в таких устройствах, как высокоточные весы) недостаточно дешев для экономичного производства крупными партиями. Поэтому делаются первые попытки для применения недорогих, приемлемых для массового производства технологий пленочного/послойного нанесения тензометрических резисторов на маленькие металлические пластинки, которые затем впрессовываются или ввариваются в эластичный элемент.

Ортогональные печатные резисторы

Практически все электрические пленочные резисторы изменяют свое сопротивление не только под воздействием боковой деформации, но и при вертикальном (ортогональном) сжатии пленки. Так называемый «проводящий пластик», широко используемый в потенциометрах, отличается здесь очень высокой чувствительностью. Также очень высокой чувствительностью обладают металлокерамика и угольные слои. До определенного предела сопротивление упомянутых выше материалов большей частью уменьшается с ростом силы сжатия. Значения, которых можно достигнуть без постоянного изменения сопротивления, похожи на те, что применимы к боковой деформацию. Конечно, датчики этого типа подходят почти исключительно для нагрузки только путем сжатия, а не поперечной деформации.

Датчики силы, измеряющие смещение

В случае с уже подпружиненными автомобильными сиденьями не важно, имеет ли установленный датчик массы, измеряющий смещение, небольшую дополнительную упругость или нет.

Датчик веса на базе датчика Холла

На рис. 4 показано использование такого датчика силы, измеряющего смещение, при котором с помощью датчика Холла измеряется эластичное отклонение в несколько десятых, миллиметра (принцип вращающегося тока). Датчик измеряет вес переднего пассажира, чтобы оптимально раскрывалась подушка безопасности. Для этого чисто механический болт, которым сиденье через поворотный рычаг крепится к направляющей, во всех четырех углах сиденья заменяется на «болт-датчик» (iBolt). Общий вес F в этом случае больше не передается непосредственно от поворотного рычага на направляющую сиденья; вместо этого он передается сначала через цилиндрический «стакан» и параллельно-направленную, вилкообразную фасонную двойную пружину. Конец, соединенный со стаканом, отклоняется пропорционально весу на несколько десятых миллиметра (< 1 мм). На отклоняющемся конце находится интегральная схема Холла, которая, при отсутствии нагрузки, расположена точно по центру перед маленьким постоянным магнитом, намагниченным в осевом направлении. Этот магнит расположен на кончике штырька, закрепленном в основании пружины. Аналогичным образом расположенный в осевом направлении датчик

Рис. 4. Датчик Холла для определения веса переднего пассажира (принцип измерения):
1 – поворотный рычаг; 2 – воздушный зазор; 3 – стакан. 4 – направляющая, 5 – измерительная пружина; 6 – интегральная схема Холла, F – сила



Холла чувствителен только к магнитным полям, направленным перпендикулярно продольной оси. Когда вес отсутствует ($F = 0$), в месте расположения датчика магнитные поля равны нулю и увеличиваются пропорционально весу с ростом возникающего отклонения.

Используемый датчик Холла, после установки, может быть компенсирован чисто электронно в плане смещения и градиента его характеристической кривой. При усилии более $F > 1000$ Н стакан (см. рис. 4) соприкасается с краем ножки измерительной пружины, что обеспечивает очень простую защиту от перегрузки. По общему виду всех четырех измерительных болтов можно определить не только вес переднего пассажира, но в определенной степени его положение на сиденье.

Оптоволоконный датчик силы

Датчики для измерения смещения также включают в себя оптоволоконные датчики, работающие по принципу микроизгиба (применение: например, системы защиты пальцев при действии стеклоподъемников). Эти датчики уже протестированы с аналогичным успехом, как и контактные и деформационные датчики, в панелях автомобильных дверей, где их можно использовать для своевременной инициации системы защиты пассажиров при боковом ударе.

Датчики момента

В случае с измерением момента, по существу, различают два процесса: измерение угла и механического напряжения. В отличие от методов измерения механического напряжения с использованием тензорезисторов или магнитоупругих датчиков, методы измерения углов (например, с помощью вихревых токов) требуют наличия вала определенной длины, работающего на кручение. Замеряются углы закручивания вала (приблизительно, в диапазоне 0,4...4,0°). Возникающее при этом механическое напряжение σ, пропорциональное моменту, направлено под углом 45° к оси вала (рис. 5).

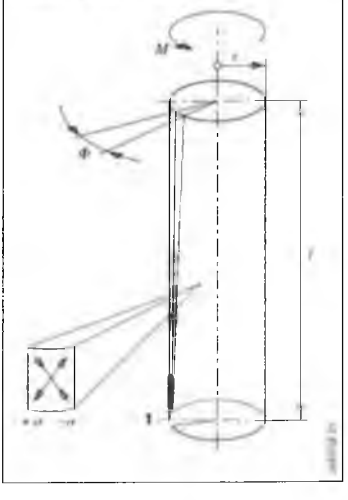
Все описанные ниже принципы подходят для бесконтактной передачи измеряемых значений, даже с вращающихся валов. В случае с измерением момент на рулевом колесе также желательно, чтобы используемая система очень точно измеряла угол поворота рулевого колеса (на полный оборот в 360°). Это отвечает духу модульной интеграции, и изменения при реализации должны быть незначительными.

Датчики измерения механической нагрузки

Тензометрические датчики

Здесь почти исключительное признание снискал тензометрический принцип (рис. 6). Для измерения механической нагрузки используется тензометрический мост, запитываемый от преобразователя (выпрямитель и управляющая электроника на валу, независимо от воздушного зазора). Другие локальные электронные компоненты на валу позволяют усилить измеряемый сигнал и преобразовать в сигнал переменного тока, не зависящий от воздушного зазора (например, частотно-аналоговый), который затем также может быть выведен с использованием бесконтактного преобразователя. При крупных партиях электронные цепи на валу можно легко встроить в один чип. Датчики деформации можно без значительных затрат штамповать на готовой стальной болванке (например, по тонкопленочным технологиям), которая затем приваривается к валу. Два кольцевых преобразователя, необходимых для передачи энергии и сигнала, можно недорого изготавливать из магнитомягкого

Рис. 5. Основные принципы измерения крутящего момента:
1 - торсионная балка, Φ - угол закручивания, σ - напряжение при кручении, M - крутящий момент, r - радиус, l - длина балки



формовочного материала. При такой схеме за счет приемлемых затрат может быть достигнут высокий уровень точности. Датчик крутящего момента на базе этого принципа был разработан для электроусилителя рулевого управления уровня образца А.

Датчики для измерения углов (торсионное измерение)

Оптоэлектронные (магнитные) датчики

Определить угол скручивания относительно легко, если на каждом конце секции, подвергаемой измерению кручения (длиной 5–10 см) имеются два взаимно-инкрементных датчика скорости вращения или бесконтактный датчик абсолютного измерения (аналоговый или цифровой) углового перемещения. Разность их выходных сигналов $\Phi_2 - \Phi_1$ определяет угол скручивания:

$M = \text{const} \cdot L \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)$, где

L – длина торсионной секции.

Этот метод до сих пор считался слишком сложным, поскольку для адекватной точности требуются исключительно точные подшипники, а также соответственно точное угловое или икрементное деление по всей периферии. Тем не менее, продолжаются поиски путей решения этой проблемы (магнитно или оптически, рис. 7), потому что такая система имела бы два явных преимущества:

- возможность одновременного измерения угла поворота в этой же системе;
- возможность измерения без необходимости значительных модификаций торсионного вала, так чтобы датчик мог быть сменным (вставным), с обеспечением эффективного интерфейса для поставляемых компонентов.

Рис. 6. Тензодатчик крутящего момента с бесконтактным преобразователем:
1 – индикатор крутящего момента, σ – напряжение при кручении; M – крутящий момент, U_0 – напряжение питания; R_1.. R_4 – деформационные резисторы

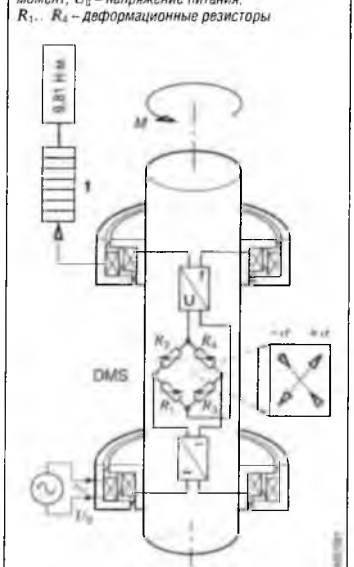
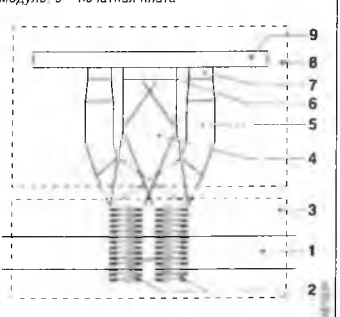


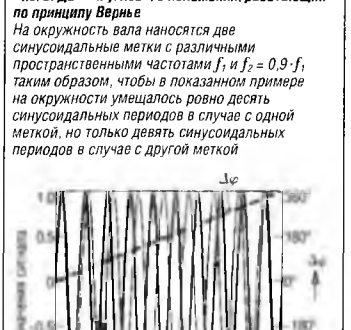
Рис. 7. Оптоэлектронный датчик, измеряющий момент на рулевом колесе по разности углов, производства компании Bishop
Оптическое считывание угловых меток:
1 – рулевой вал с торсионной балкой;
2 – кодирующие диски со штрих-кодом;
3 – корпус рулевого механизма; 4 – линза;
5 – светопроводящие элементы, 6 – оптическая интегральная схема; 7 – светодиод; 8 – сенсорный модуль, 9 – печатная плата



Высокоточное измерение углового положения можно выполнить, например, по принципу Вернье. Здесь окружность вала отмечается синусоидальной меткой, при этом на окружности умещается общее количество периодов синусоиды, равное N. В отличие от чисто инкрементной метки, которая обеспечила бы лишь разрешение $1/N$ длины окружности при том же количестве периодов, эта синусоидная структура сигнала теоретически допускает любое разрешение по окружности путем применения функции арксинуса в отдельных синусоидальных периодах. Однако это разрешение можно использовать, только если известно, в каком из N периодов мы находимся.

Однозначности можно добиться путем добавления в окружность второй метки с чуть меньшей пространственной частотой, в которой только $N-1$ синусоидальных периодов умещаются на окружности. Хотя два сигнала не могут обеспечить четких сигналов для измерения углового положения, можно по фазовой разности $\Delta\varphi$ между двумя сигналами определить синусодальный период, в котором мы находимся. Это происходит потому, что фазовая разность между двумя сигналами изменяется по всей длине окружности ровно на 360°. Это можно увидеть на рис. 8 на примере $N = 10$. Если фазовая разность между двумя сигналами, к примеру, находится в диапазоче 36–72°, то мы находимся во втором синусоидальном периоде; если она находится в диапазоне 216–252°, то мы находимся в шестом периоде. Точный угол измерения Φ в этом случае получается путем добавления в первом случае угла 36°, а во втором – 216° к измеренному, но еще не четкому сигналу φ.

Рис. 8. Датчик углового положения, работающий по принципу Вернье
На окружность вала наносятся две синусоидальные метки с различными пространственными частотами f_1 и $f_2 = 0{,}9 \cdot f_1$ таким образом, чтобы в показанном примере на окружности умещалось ровно десять синусоидальных периодов в случае с одной меткой, но только девять синусоидальных периодов в случае с другой меткой



Однако на практике функция арксинуса не используется для высокого разрешения отдельных синусоидальных периодов, так как для этого пришлось бы гарантировать постоянную и нормализованную амплитуду сигнала. Вместо этого рядом с синусоидальной меткой вводится вторая, косинусоидальная метка, находящаяся точно в квадратуре с первой (сдвиг по фазе на 90°). Из-за пространственной близости можно допустить, что обе метки считываются с одинаковой амплитудой $\hat{u}$ таким образом, чтобы угол φ можно было определить в пределах синусоидального периода с помощью функции арктангенса по двум отдельным сигналам u_1 и u_2 независимо от u:

$\varphi = \arctan(u_1/u_2)$, где
$u_1 = \hat{u} \cdot \sin\varphi$ и
$u_2 = \hat{u} \cdot \cos\varphi$.

Таким образом, для определения точного и однозначного угла поворота Φ всего требуется четыре метки. Поэтому датчику момента и угла поворота на рулевом колесе (TAS, рис. 7) в общей сложности требуется восемь оптоэлектронно считываемых меток для измерения двух углов Φ_1 и Φ_2. Его точность в диапазоне 360° составляет 1°, угловое разрешение равно 0,0055° и разрешение дифференциального угла $\Delta\varphi$ равно 0,0044° с диапазоном измерения ± 9°.

Датчики вихревых токов

К обоим концам достаточно длинной секции измерительного вала крепятся две втулки из токопроводящего алюминия с прорезями. Они вставляются одна в другую (рис. 9). Каждая втулка имеет два ряда прорезей, чтобы при повороте вала его было лучше видно через один ряд прорезей и хуже через другой. Это приводит увеличению или уменьшению затухания у двух высокочастотных обмоток (около 1 МГц), расположенных над каждым рядом прорезей, так что соответственно меняется и индуктивность обмоток. Для достижения заданной точности втулки с прорезями должны изготавливаться и собираться с соответственно высокой точностью. Электро-

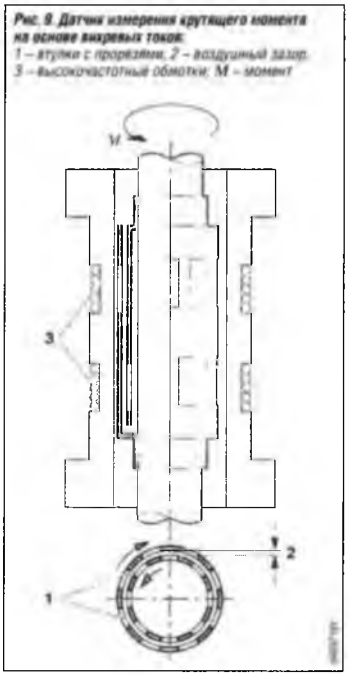


Рис. 9. Датчик измерения крутящего момента на основе вихревых токов:
1 – втулка с прорезями; 2 – воздушный зазор; 3 – высокочастотные обмотки; M – момент

нику следует размещать как можно ближе к обмоткам.

Этот принцип был разработан компанией Bosch для автопромышленности, но затем нашел применение только в электроинструментах (определение крутящего момента в профессиональных шуруповертах). Однако одна японская компания, купившая у Bosch лицензию, доработала этот принцип для использования в автомобилях.

Оптоэлектронные датчики

Внутренний фотоэлектрический эффект

Внутренний фотоэлектрический эффект создает основу для оптоэлектронных чувствительных элементов. Свет можно рассматривать как поток отдельных квантов (фотонов). Энергия E_{Ph} фотона зависит только от его частоты f или длины волны λ:

$$E_{Ph} = h\,f = h\,c/\lambda \qquad \text{(уравнение 1),}$$

где h – квант действия Планка.

Когда фотоны сталкиваются с атомами, каждый из них, при наличии достаточной энергии, может освободить электрон из внешней оболочки. Необходимая для этого энергия соответствует разности между энергией E_V валентной зоны атома и энергией E_L зоны проводимости, т.е. межзонного интервала E_g:

$$E_g = E_L - E_V \qquad \text{(уравнение 2).}$$

Следовательно, для освобождения электрона энергия E_{Ph} должна быть больше межзонного интервала E_g. В чистом полупроводнике, в результате поглощения фотонов, создаются пары носителей заряда (электроны и дырки). Преодолеваемый межзонный интервал, к примеру, у кремния составляет E_g = 1,12 эВ при комнатной температуре. Без специальных мер созданные пары носителей заряда уже через короткое время рекомбинируют. Однако создаваемое излучение в случае с кремнием не попадает в видимый глазу спектр.

В сильно легированных полупроводниках упомянутый выше внутренний фотоэлектрический эффект дополняется внешним фотоэлектрическим эффектом. Поскольку преодолеваемый энергетический перепад в таких внешних датчиках значительно меньше, они также подходят для излучения более длинных волн (инфракрасный диапазон).

Для энергий $E_{Ph} < E_g$ не происходит дальнейшего освобождения. Согласно уравнению 1 в случае с кремнием это соответствует предельной длине волны λ_g = 1,1 мкм (рядом с ИК-диапазоном). Свет с большей длиной волны или меньшей частотой уже не поглощается; здесь кремний становится прозрачным.

Светочувствительные элементы

Фоторезисторы

Случайный свет приводит к созданию пар носителей заряда в датчике с конфигурацией резистора (LDR, светочувствительный резистор); эти пары носителей заряда увеличивают проводимость G. Через короткое время (считанные миллисекунды) они рекомбинируют; но, тем не менее, повышается концентрация пар носителей заряда в стационарном равновесии с освещенностью E согласно следующему закону:

$G \approx \text{const} \cdot E^{\gamma}$ (уравнение 3),
где $\gamma = 0{,}7 - 1$

В качестве светочувствительных материалов обычно используются сульфид кадмия CdS (E_g = 1,8 эВ; λ_g = 0,7 мкм) и селенид кадмия CdSe (E_g = 1,5 эВ; λ_g = 0,8 мкм) на керамических подложках.

p-n-переходы в полупроводниках

По существу разницы между фотоэлементом, фотодиодом и фототранзистором нет. В качестве измерительного эффекта все они используют фототок или безнагрузочное напряжение в освещенных p-n-переходах. Однако элементы различаются принципами работы.

Носители заряда, создаваемые внутренним фотоэффектом в запирающем слое p-n-перехода (рис. 1), сразу же ускоряются электрическим полем в области пространственного заряда с низкой концентрацией носителей заряда, в результате чего носители заряда расщепляются сразу после создания (дрейфовый ток). Их рекомбинация практически предотвращается, и фоточувствительность значительно повышается.

Фотоэлементы

Фотоэлементы работают без внешнего напряжения смещения и могут действовать как без нагрузки (фотоэлектрический эффект), так и в короткозамкнутом режиме. Они имеют низкий фоновый шум и, соответственно, высокую обнаруживающую способность.

Характеристические кривые, применимые к этим режимам (рис. 2), могут быть легко выведены как частные случаи работы диода, поляризованного в прямом направлении с напряжением U с термически кондиционированным током насыщения в закрытом состоянии I_S, и фототоком I_{ph}, текущим в обратном направлении:

$I = I_S \cdot \exp(e \cdot U / k \cdot T) - I_S - I_{ph}$ (уравнение 4),
где
e – элементарный заряд;
k – постоянная Больцмана;
T – абсолютная температура.

Особые случаи:

$U = 0$ (короткозамкнутый режим) $\rightarrow I = I_K = -I_{ph}$;

$I = 0$ (без нагрузки);

$$\rightarrow U = U_L = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right).$$

Фотоэлементы обычно имеют очень большую чувствительную к излучению поверхность и, соответственно, также обеспечивают

Рис. 1 Разделение созданных пар «электрон-дырка» в плоском полупроводниковом компоненте с p-n-переходом:
1 – оптическое покрытие, 2 – контакт, 3 – SiO_2; 4 – металлический контакт

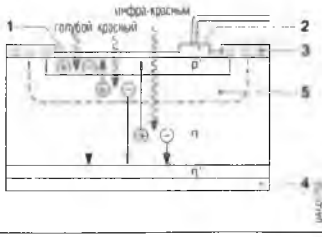
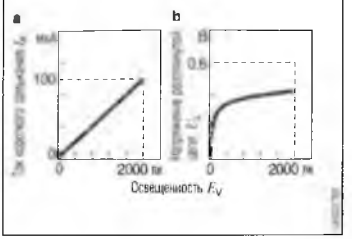


Рис. 2 Характеристические кривые фотоэлемента в зависимости от освещенности:
a – ток короткого замыкания I_K,
b – напряжение разомкнутой цепи U_L



относительно высокий фотоэлектрический ток (например, I_{ph} = 250 мкА при E = 1000 лк). Их постоянная времени прямо пропорциональна и обычно составляет порядка 20 мс.

Фотодиоды, фототранзисторы

Фотодиоды работают с постоянным напряжением смещения U_S в обратном направлении, где фототок, протекающий как обратный ток, линейно зависит от освещенности E (рис. 3). Область пространственного заряда увеличивается при подаче обратного напряжения. В результате уменьшается емкость p-n-перехода так, что частота отсечки такого фотодиода составляет несколько МГц.

В случае с фототранзистором, изображенном на рис. 4 (*npn*), диод «коллектор-база», поляризованный в обратном направлении, действует как фотодиод. Таким образом, коллектор, как у любого транзистора, подает фототок, усиленный на коэффициент B (≈ 100–500) (соответственно току базы). Однако, увеличение чувствительности получается за счет чуть худшей частотной динамики и чуть худшей термической характеристики.

Применение

Датчик загрязнения фар

С помощью такого датчика измеряется уровень загрязнения отраженного света состоит из источника света (светодиод) и приемника света (фототранзистор). Источник расположен на внутренней стороне рссеивателя в пределах очищаемой поверхности, однако не на пути основного светового луча. Если рассеиватель чистый или покрытый каплями дождя, луч, испускаемый светодиодом, проходит через рассеиватель без помех. Только незначительная часть отражается назад – к приемнику света. Если луч наталкивается на частички грязи на внешней поверхности рассеивателя, то отражается обратно к приемнику с интенсивностью, прямо пропорциональной степени загрязнения; очиститель фары включается при достижении определенного уровня загрязнения.

Рис. 3. Характеристические кривые фотодиода при постоянном освещении E

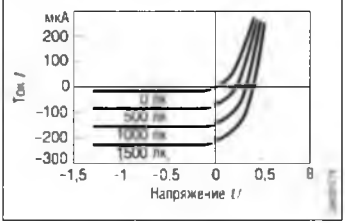


Рис. 4. Характеристические кривые фототранзистора при постоянном освещении E

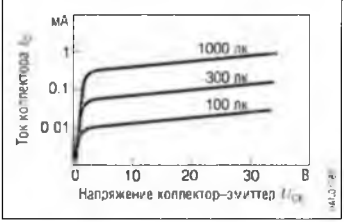
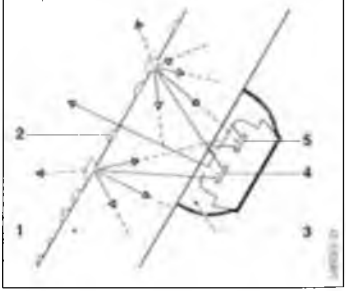


Рис. 5. Датчик загрязнения фар:
1 – рассеиватель; 2 – частица грязи; 3 – чувствительный элемент, 4 – передатчик, 5 – приемник

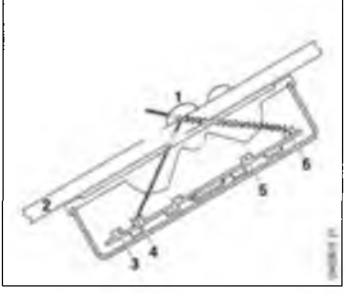


Датчик дождя

Датчик дождя распознает капли воды на ветровом стекле для автоматического включения стеклоочистителей. Но водитель может использовать и ручное управление; если нужно, автоматическая система может быть выбрана вручную при запуске двигателя.

Датчик состоит из оптической линии передачи и приемного канала (подобно датчику загрязнения фары). Однако луч света направляется на стекло под некоторым углом. Сухая внешняя поверхность стекла полностью отражает весь свет обратно к приемнику, который также установлен под углом (рис. 6). Если на внешней поверхности стекла имеются водяные капли, то они рассеивают свет, ослабляя, таким образом, сигнал. Стеклоочиститель ветрового стекла реагирует также и на загрязнения, превышающие порог срабатывания.

Рис. 6. Датчик дождя для ветрового стекла:
1 – капля дождя, 2 – ветровое стекло; 3 – датчик наружного освещения; 4 – фотодиод; 5 – датчик света, настроенный на большое расстояние; 6 – светодиод



Датчики для систем повышения безопасности при движении (DAS)

Ультразвуковая технология

Области применения

В современных системах, помогающих при движении задним ходом и парковке (см. «Системы парковки автомобилей») используются ультразвуковые датчики малой дальности действия (порядка 2,5 м). Они встраиваются в бамперы автомобилей и служат для вычисления расстояний до препятствий с целью контроля пространства при парковке и маневрировании. При приближении к препятствию система выдает водителю звуковые и световые сигналы.

Более новые датчики с дальностью действия до 4,5 м позволяют использовать систему помощи при парковке, которая либо выдает водителю инструкции по оптимальной парковке, либо осуществляет руление при въезде на парковочное место, а водителю остается лишь следить за перемещением автомобиля в продольном направлении.

Конструкция ультразвукового датчика

Ультразвуковой датчик (рис. 1) состоит из пластмассового корпуса со встроенным штырьковым разъемом, ультразвукового преобразователя (алюминиевого блока с диафрагмой, на внутреннюю часть которой приклеен пьезокерамический элемент) и печатной платы с передающей и оценивающей электроникой. Они электрически соединены с ЭБУ с помощью трех выводов, два из которых – питающие. Третий, служащий в качестве двунаправленной сигнальной линии, используется для активизации функции передачи сигналов и принятия возвращенного сигнала.

Принцип работы ультразвукового датчика

Ультразвуковой датчик принимает от ЭБУ цифровой импульс. Затем электроника заставляет колебаться алюминиевую диафрагму с прямоугольными импульсами на резонансной частоте (около 48 кГц) с типичным периодом порядка 300 мкс, в результате чего испускаются ультразвуковые импульсы. Отраженный от препятствия звук снова заставляет колебаться диафрагму, между тем уже успокоившуюся (прием невозможен в течении периода успокоения, порядка 900 мкс). Эти колебания выводятся пьезоэлектрическим элементом в виде аналогового электрического сигнала, который затем усиливается и преобразуется в цифровой.

Обычно ультразвуковые датчики для описанной области применения имеют селективную характеристику испускания с широким диапазоном чувствительности по горизонтали (для определения как можно большего количества объектов) и узким диапазоном чувствительности по вертикали (во избежание отражений от земли).

Радарная технология

Области применения

Радарная технология используется, помимо прочего, в адаптивном круиз-контроле (ACC) для определения движущихся впереди автомобилей и соответственной адаптации скорости движения. Излучаемые радаром электромагнитные волны отражаются от металлических поверхностей и других отражающих материалов и затем регистрируются приемной частью радара. Расстояние до объектов в диапазоне чувствительности можно измерить на основании времени распространения этих волн. Для измерения относительной скорости используется эффект Допплера.

Благодаря своим превосходным свойствам в плане быстрого и точного измерения расстояния и относительной скорости радар также очень хорошо подходит для использования в системах активной и пассивной безопасности. Примерами таких систем являются прогнозирующие системы аварийного торможения и раннего распознавания столкновений.

Рис. 1. Вид ультразвукового датчика в разрезе:
1 – пьезокерамический элемент,
2 – разъединяющее кольцо; 3 – пластмассовый корпус со штырьковым разъемом; 4 – печатная плата с передающей и оценивающей электроникой, 5 – преобразователь, 6 – приклеенный провод, 7 – алюминиевая диафрагма



Методы испытаний

Принимаемые сигналы сравниваются с передаваемыми по времени распространения или частоте. Используемые методы значительно различаются по способу сравнения сигналов. Передаваемые волны модулируются, чтобы принимаемый сигнал можно было уникально сопоставить передаваемому. Самыми распространенными формами модуляции являются импульсная, где генерируются импульсы в 10–30 нс, что соответствует длине волны 3–10 м, и частотная, где во время передачи мгновенная частота волн изменяется в зависимости от времени.

У всех радарных датчиков измерение расстояния основано на прямом или косвенном измерении времени распространения сигнала с момента его передачи и до момента его приема в виде отраженного сигнала.

Импульсная модуляция

В случае импульсной модуляции измеряется время распространения τ сигнала от его передачи до его приема. Принятый волновой пакет нужно демодулировать, чтобы извлечь нужную информацию. Учитывая скорость света, можно вычислить расстояние до движущегося впереди автомобиля по разности времени. При прямом отражении оно определяется как двойное расстояние d до отражателя, поделенное на скорость света c:

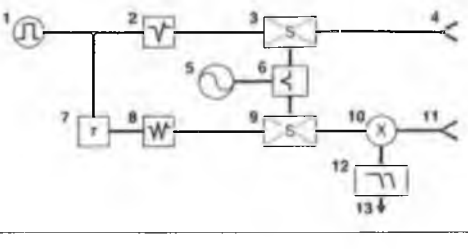
$$\tau = \frac{2d}{c}.$$

Для расстояния d = 150 м и $c \approx 300\,000$ км/с время распространения $\tau \approx 1{,}0$ мкс.

Импульсный радар испускает очень короткие импульсы. Эти сигналы отражаются от предметов и возвращаются к датчику. Требуется измерить время распространения этих сигналов. На рис. 2 показана блок-схема импульсного радара. Генератор с частотой, к примеру, 24 ГГц, передает сигналы на делитель мощности. Его выходные сигналы подаются на два высокоскоростных переключателя в двух каналах, изображенных на схеме. В верхнем тракте (передающем) сигналы от генератора импульсов сначала модулируются и затем выдаются на высокоскоростной переключатель (высокочастотный модулирующий переключатель). Из этого блока сигналы проходят на передающую антенну. В нижнем параллельном тракте (принимающем) регулируемая задержка генерирует опорные сигналы, подаваемые на высокоскоростной переключатель в передающем тракте. Принятый отраженный сигнал смешивается с выходным сигналом генератора, что служит когерентным опорным значением для определения измерений частоты в принятом отраженном сигнале. Когерентность в этом контексте означает, что фаза переданного импульса остается сохраненной в опорном сигнале. Изменение определяется фильтром Допплера.

Излучаемая пиковая мощность в 20 дБм EIRP (уровень мощности при опорном значении 1 мВт) дает расстояние измерения 20–50 м, в зависимости от размера и отражающих свойств данного предмета. Минимальное расстояние измерения составляет около 25 см.

Рис. 2. Блок-схема импульсного радара:
1 – генератор импульсов, 2 – модуляция для генератора импульсов, 3 – выключатель высокочастотной модуляции, 4 – передающая антенна, 5 – генератор с частотой 24 ГГц, 6 – делитель мощности, 7 – задержка времени, 8 – модуляция для генератора импульсов, 9 – выключатель высокочастотной модуляции, 10 – микшер, 11 – приемная антенна, 12 – фильтр Допплера, 13 – выход



Модуляция FMCW

На рис. 3 показана блок-схема радара FMCW (частотно-модулированная незатухающая гармоническая волны). Генератор на диоде Ганна в эхо-резонаторе или новый генератор на базе SiGe параллельно подает сигналы, к примеру, на четыре патч-антенны, расположенные рядом друг с другом и также служащие для одновременного приема отраженных сигналов. Установленная спереди пластмассовая линза Френеля фокусирует передаваемые и принимаемые лучи, относительно оси автомобиля, в горизонтальном и вертикальном направлениях. Характеристики антенны в плане передачи и приема имеют веерообразную форму в четырех разных направлениях из-за смещения антенн от центра. По расстоянию a до транспортных средств, движущихся впереди, и по их относительной скорости Δv можно оценивать изменение ситуации относительно той, при которой они были обнаружены. Этот метод используется для обнаружения нескольких автомобилей.

Направленные ответвители разделяют передаваемые и принимаемые отраженные сигналы. Путем смешивания частоты приема и частоты передачи находящиеся далее микшеры переносят частоту приема на более низкие частоты (0–300 кГц). Чтобы оценить их, низкочастотные сигналы оцифровываются и проходят высокоскоростной (гармонический) анализ Фурье для определения частот.

Метод работы разъясняется ниже на примере генератора Ганна. Частота генератора на основе диода Ганна непрерывно сравнивается с эталоном частоты диэлектрического резонансного генератора (DRO) и регулируется до определенной заданной величины. В данном случае напряжение питания диода Ганна изменяется до тех пор, пока частота снова не будет соответствовать заданной. Через эту цепь с обратной связью, с пилообразными колебаниями, частота передачи f_s генератора Ганна кратковременно повышается и понижается на 300 МГц каждые 100 мс (частотная модуляция). Сигнал, отраженный от впереди идущей машины, изменяется в соответствии со временем его прохождения, как показано на рис. 4, т.е., при увеличении расстояния до впереди идущей машины – путем понижения частоты, а при уменьшении расстояния – путем повышения частоты f_e на ту же величину Δf. Разность частот Δf является прямой мерой расстояния a:

$$\Delta f = |f_s - f_e| = c_1 a \quad \text{(например, } c_1 = 2 \text{ кГц/м)}.$$

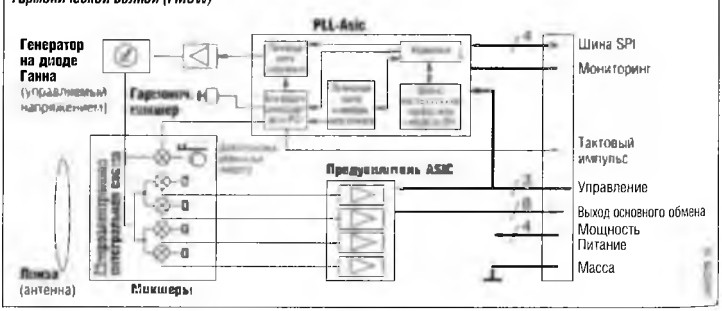
Если же между двумя движущимися автомобилями будет дополнительная относительная скорость Δv, то принимаемая частота f_e увеличивается (при приближении) или уменьшается, на основании эффекта Допплера, как при возрастании, так и при снижении расстояния между машинами пропорционально величине:

$$\Delta f_d = c_2 \Delta v \quad \text{(например, } c_2 = 512 \text{ Гц на м/с)}.$$

Иными словами, имеются две дифференциальных частоты Δf_1 и Δf_2. Их сумма соответствует расстоянию между автомобилями, а разность – относительной скорости Δv их движения (рис. 4). При увеличении расстояния:

$$|\Delta f_1| = f_s - f_e = \Delta f - \Delta f_d = c_1 a - c_2 \Delta v.$$

Рис. 3. Блок-схема 4-канального радара с частотно-модулированной незатухающей гармонической волной (FMCW)



При уменьшении расстояния:

$$|\Delta f_2| = f_e - f_s = \Delta f + \Delta f_d = c_1 a + c_2 \Delta v.$$

Это значит, что:

$$a = \frac{|\Delta f_2| - |\Delta f_1|}{2c_1},$$

$$\Delta v = \frac{|\Delta f_2| - |\Delta f_1|}{2c_2}$$

Определение угла

Третьей основной величиной, помимо расстояния и относительной скорости, является боковое смещение (угол) объекта. Единственный способ измерить его – путем испускания луча радара в нескольких направлениях. Затем по отраженным сигналам определяется направление, из которого принят самый сильный отраженный сигнал. Чтобы определить угол, под которым радар находит объект, либо направляется один луч (сканирование), либо параллельно испускаются и анализируются несколько лучей.

Для измерения угла требуются не менее двух перекрывающихся лучей. Усиления амплитуд, измеряемых для определенного объекта в соседних лучах, позволяют сделать вывод об угле обзора. На практике сегодня используется четыре луча, с угловым разрешением 1–2°.

Рис. 4. Измерение расстояния и скорости с помощью радиолокационной установки с частотно-модулированной незатухающей гармонической волной (FMCW):
f_s – частота передачи, f_r – входная частота без относительнои скорости, f_r – входная частота с относительной скоростью, Δf_d – рост частоты за счет эффекта Допплера (при относительной скорости), $\Delta f_1/\Delta f_2$ – дифференциальная частота без относительной скорости / с относительной скоростью



Радар малой дальности (24 ГГц)

Используются два типа радаров малой дальности: узкополосные датчики и ультраширокополосные датчики (UWB). Диапазон узкополосных датчиков составляет несколько МГц в диапазоне ISM (промышленность, наука и медицина) при 24 ГГц и они отличаются низкой разделяемостью объектов. Разделяемость объектов у датчика UWB с типичным диапазоном 5 ГГц – высокая, порядка нескольких сантиметров при удаленности объектов около 1,5 м. Функции безопасности, реализованные с помощью датчиков этого типа (например, датчиков раннего распознавания столкновения) требуют коротких циклов измерения, порядка 2 мс и менее.

Диапазон типичных радарных датчиков малой дальности составляет от 2 до 20–50 м, в зависимости от функции помощи водителю.

Датчики этого типа были впервые представлены в 2005 году в системах адаптивного круиз-контроля (ACC) с помощью при движении в пробках. Здесь используются два радарных датчика малой дальности. Если с помощью этой сенсорной технологии потребуется реализовать дополнительные функции, то спереди и сзади автомобиля потребуется установить до четырех датчиков.

Радар большой дальности

Радар большой дальности (LRR), используемый для адаптивного круиз-контроля (ACC), сканирует зону перед движущимся автомобилем на расстояние до 250 м. Рабочая частота 76,5 ГГц (длина волны λ = 3,8 мм) допускает относительно низкопрофильные конструкции, необходимые в автомобилях.

Лидар

Лидары (лазерные локаторы ИК-диапазона) для адаптивного круиз-контроля (ACC) уже несколько лет используются в Японии. В принципе, лидары работают так же, как и радары, но отличаются от последних тем, что используют электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне 800–1000 нм, а не микроволны в миллиметровом диапазоне. Лучи лидара могут иногда значительно заглушаться туманом и условиями плохой видимости, особенно брызгами. Это может, соответственно, уменьшить дальность измерения. Поэтому они подходят для систем безопасности хуже, чем радары.

Инфракрасное излучение модулируется по интенсивности, но не по частоте. Блок-схема лидара показана на рис. 5. Лидар создает модулированное инфракрасное излучение, отражаемое от предметов и принимаемое одним или несколькими фотодиодами в датчике. Модуляция может иметь следующие формы: прямоугольные волны, синусоидальные колебания или импульсы. Модулятор передает информацию о модуляции на приемник. Таким образом, принятый сигнал можно сравнить с переданным, чтобы определить либо фазовую разность сигналов, либо время их распространения, и на основании этого вычислить расстояние до объекта. Отношение «сигнал-шум» очень сильно зависит от типа модуляции, наилучшие результаты достигаются при импульсной модуляции. Поэтому импульсная модуляция используется на практике для лидаров большой дальности. Типичные значения длительности импульсов находятся в наносекундном диапазоне. Соответственно, длина импульсов составляет порядка 1 метра. Для достижения точности измерения сантиметрового порядка можно использовать подходящие методы обработки сигналов.

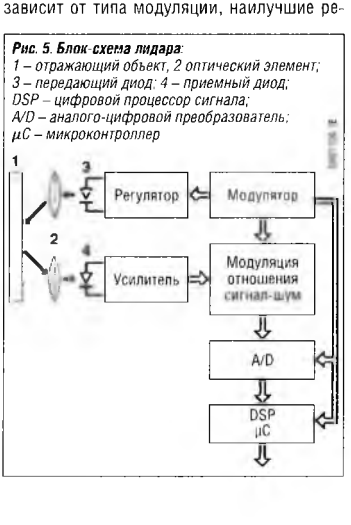


Рис. 5. Блок-схема лидара:
1 – отражающий объект, 2 оптический элемент; 3 – передающий диод; 4 – приемный диод; DSP – цифровой процессор сигнала; A/D – аналого-цифровой преобразователь; µC – микроконтроллер

Горизонтальное и вертикальное разрешение достигается либо путем многолучевой конфигурации, либо путем механического сканирования. Преимущество механического сканирования состоит в очень высоком угловом разрешении при использовании всего одного приемно-передающего блока. Лучевое сканирование реализуется либо путем использования поворотного зеркала, либо путем перемещения оптического элемента передатчика или приемника вперед-назад.

В отличие от большинства радарных датчиков, лидар не измеряет непосредственно скорость объекта. Скорость вычисляется путем дифференцирования сигнала расстояния, в результате происходит определенная задержка и ухудшается качество сигнала. С другой стороны, хорошее горизонтальное разрешение сканирующего лидара намного превосходит разрешение типичного современного радарного датчика.

Видеотехнология

Области применения

Изображения несут в себе наибольшую часть информации, воспринимаемой человеком. Следовательно, очевидным методом в контексте разработки систем повышения безопасности при движении (DAS) является запись изображений, извлечение из них нужных деталей и выявление опасных ситуаций посредством обработки изображений.

На первом этапе на рынок были выведены функции на основе видео – например, систем ночного видения, систем слежения за дорожной разметкой и распознавания дорожных знаков. На втором этапе функции, корректирующие динамику автомобиля через тормоза, рулевое управление и дроссельную заслонку (прежде всего при взаимодействии нескольких датчиков) открывают новые, эффективные перспективы для надежного предотвращения ДТП и смягчения их последствий.

В этом контексте в автомобильной системе выполняются две различные задачи. Когда

требуется создать особенно контрастное, яркое изображение, необходимое в системах ночного видения, производится обработка изображения. Затем обработанное изображение выводится непосредственно на дисплей. Вторая задача предусматривает извлечение конкретного содержания изображения с помощью специальных алгоритмов (например, распознавание дорожных знаков). Принятую информацию можно затем использовать для предупреждения водителя сигналами на дисплее или активации соответствующих исполнительных органов.

Основные принципы фотосчитывания

Когда полупроводник освещается фотонами, создаются пары «электрон-дырка». Они, в свою очередь, генерируют электрическое поле, рекомбинируют и создают фотоэлектрический ток. Здесь показатель «квантовая эффективность η» описывает количество пар «электрон-дырка», создаваемых одним фотоном.

Практически все проникающие в полупроводник фотоны преобразуются в электрические заряды. Однако существует сильная спектральная зависимость от средней длины поглощения, в которой возникает это фотопреобразование. Коротковолновый свет в принципе поглощается на поверхности полупроводника, а длинноволновый проникает глубоко внутрь него. Поэтому изображения с большим содержанием волн красного и инфракрасного диапазонов (например, системы улучшения ночного видения) имеют гораздо меньший контраст, чем изображения, записанные в коротковолновой части спектра. Поэтому для систем ночного видения важно обрабатывать изображения в сторону улучшения контрастности. В системах любительского уровня перед камерой часто устанавливаются оптические фильтры для отсечки инфракрасной части спектра.

Фотоэлектрический ток растет пропорционально, на много порядков, падающему световому потоку и строго линеен в широком динамическом диапазоне. Именно это делает полупроводниковые фотодатчики такой привлекательной перспективой для многочисленных систем массового спроса и измерительных систем.

Двумя наиболее важными фоточувствительными полупроводниковыми структурами являются фотодиод (рис. 6) и металлооксидный полупроводниковый конденсатор (МОП-конденсатор, рис. 7), используемый в ПЗС-датчиках приборах с зарядовой связью. Обе эти полупроводниковых структуры изготавливаются по стандартным полупроводниковым технологиям.

Фотодиод состоит из сочетания полупроводниковых материалов с различными проводящими свойствами. В области пространственного заряда на стыке двух полупроводниковых материалов существует электрическое поле. В то же время область пространственного заряда имеет определенную емкость, обратно пропорциональную ее толщине. Фотодиоды типично заряжаются до определенного потенциала и затем подвергаются воздействию света. Теперь фотоэлектрически генерируемые заряды распространяются по всей области пространственного заряда и накапливаются в фотодиодном конденсаторе. Остаточное напряжение измеряется сразу после облучения фотодиода светом. Разница между этим напряжением и напряжением сброса является мерой падающего света.

Рис. 6. Фотодиод:
1 – контакт, 2 – n^+-кремниевая подложка, 3 – p-кремниевая подложка; 4 – область пространственного заряда

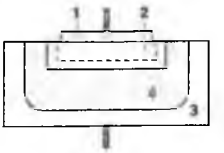
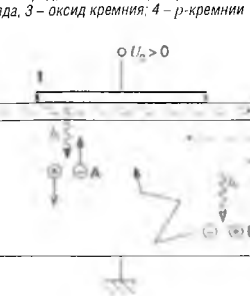


Рис. 7. МОП-конденсатор, работающий как интегрирующий фотодатчик:
1 – электрод, 2 – область пространственного заряда, 3 – оксид кремния; 4 – p-кремнии



МОП-конденсатор (рис. 7) состоит из полупроводникового материала, покрытого тонким оксидным слоем. На оксидный слой наносится металлический проводящий слой. При подаче положительного напряжения на металлический электрод МОП-элемента под изолирующим оксидным слоем создается область пространственного заряда стационарных положительных зарядов. В случае падения света через прозрачный изолированный электрод (переднее облучение) или через подложку (заднее облучение) в этой зоне собираются фотоэлектрически генерируемые электроны без возможности рекомбинирования и оттока.

Типичное значение емкости фотодиода и МОП-конденсатора составляет 0,1 фФ/мкм.

ПЗС-матрицы

Для изготовления датчиков формирования изображений многие фотодиоды или МОП-конденсаторы соединяются в матрицы с большим числом пикселов. В то время как выходные сигналы фотодиодов соответствуют мгновенным значениям светового потока (освещенности), следующие две структуры являются, по своей сути, интегрирующими. Их сигнал соответствует общему количеству фотонов, проникших в датчик за время освещения. Такие датчики, в основном, нужны для изготовления линейных или одноплоскостных матриц по принципу ПЗС (приборы с зарядовой связью, CCD).

В случае с этими p-n-фотодиодами лишь небольшая часть p-n-перехода чувствительна к излучению из-за экрана с вакуумным напылением. Но фотоэлектрически генерируемые заряды распространяются по всей области пространственного заряда и накапливаются там (в МОП-конденсаторе). Когда канальный полевой униполярный МОП-транзистор закрыт, они могут оттекать к совместно используемой сигнальной линии (видеовыходу). МОП-транзистором управляет генератор синхронизирующих импульсов через сдвиговый регистр (рис. 8). Заряды, последовательно протекающие через видеовыход, являются мерой дозы излучения фотодиодов, активируемых в каждом случае.

Чтобы после облучения можно было сместить измерительный заряд по горизонтали, рядом с освещаемой зоной или коллекторным электродом располагаются дополнительные электроды, как показано на рис. 9; во время интеграционной фазы они находятся на нулевом потенциале. Если затем увеличить потенциал бокового переходного электрода на положительное значение при одновременном уменьшении потенциала коллекторного электрода, то заряд можно сместить на соседний МОП-элемент, защищенный экраном от падения света.

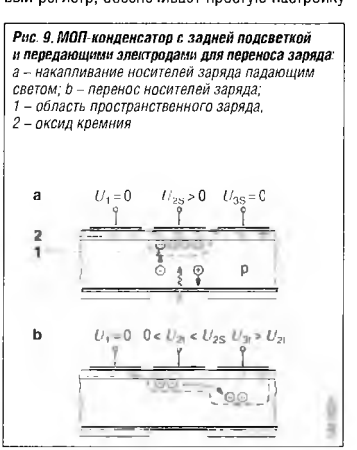
Этот принцип переноса заряда формирует основу приборов с зарядовой связью. Согласно этому принципу аналоговые заряды можно смещать или передавать через многие станции до полного преобразования в конце цепочки преобразований посредством усилителя заряда, к примеру, в сигнал напряжения, который можно подать на быстрый аналогово-цифровой преобразователь.

Этот метод передачи заряда, который можно также рассматривать как аналоговый сдвиговый регистр, обеспечивает простую настройку

Рис. 8. Линейное расположение фотодиодов с линией последовательного вывода



Рис. 9. МОП-конденсатор с задней подсветкой и передающими электродами для переноса заряда: *a – накапливание носителей заряда падающим светом; b – перенос носителей заряда;*
1 – область пространственного заряда,
2 – оксид кремния



длинных линейных множественных структур, а также матричных структур. Мельчайший элемент этих структур также называют пикселом (pixel, сокращение от picture element). На данный момент максимально возможное количество пикселов для линейных датчиков составляет около 6000, а у матричных – порядка 2000–2000, т.е. четыре миллиона. Сегодняшние датчики для формирования изображений в автомобилях работают с разрешением менее одного миллиона пикселов. Для более сложных автомобильных систем желательно иметь гораздо большее количество писелов. В камерах уровня потребительской электроники используются датчики с более чем 10 миллионами пикселов.

Размер пикселов, принимающих свет от традиционной линзы для передачи изображений, сегодня варьируется в диапазоне 5–20 мкм. Соответственно, площадь матрицы составляет порядка 1 см^2. Если требуется уменьшить размер отдельных пикселов для увеличения разрешения или стоимости матрицы, важно помнить, что повлечет за собой уменьшение количества фотонов, попадающих на пиксел. Таким образом, ограничения по уменьшению размера пикселов диктуются неизбежным ухудшением соотношения «сигнал/шум»; с увеличением разрешения растет уровень цифрового шума.

Ограничивается даже заряд, поглощаемый отдельными, интегрирующими ячейками. При превышении этого предела заряд может «перетечь» в соседние ячейки Это также называют эффектом расплывания изображения, который в принципе ограничивает динамическую реакцию «светлый/темный» в ПЗС-технологии. Даже с дополнительными мерами против расплывания изображения эту динамическую реакцию едва удается увеличить сверх величины около 50 дБ без дополнительных мер, таких как регулируемые экран и время выдержки.

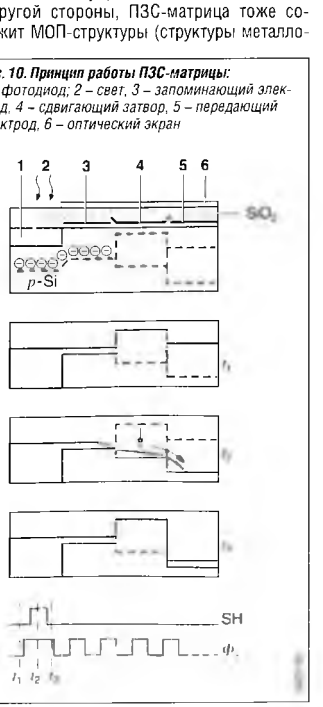
Как показано на рис. 10, создаваемые в фотодиоде фотоэлектрические заряды сначала смещаются из зоны экспозиции посредством перемещающихся электродов и управляющих сигналов в сторону, в столбцовую структуру. Затем заряды всех столбиков по тому же принципу одновременно смещаются вниз, где они рядами перетекают в горизонтальный «сдвиговый регистр». Оттуда они последовательно считываются и обрабатываются.

Сегодня ПЗС-матрицы – наиболее распространенная полупроводниковая технология с датчиками для формирования изображений. Однако ограниченная реакция «светлый/темный», относительно высокая потребляемая мощность по сравнению с другими технологиями при трех разных рабочих напряжениях, и ограниченный диапазон температур не позволили им получить широкого распространения в автомобилях.

КМОП-матрицы

Сегодня КМОП-матрицы являются более перспективным решением по сравнению с ПЗС-матрицами, и уже широко используются во многих областях. Здесь понятие «КМОП-матрица» может внести путаницу, потому что КМОП (сокращение от «комплементарный металло-оксидный полупроводник») – это особая полупроводниковая технология. С другой стороны, ПЗС-матрица тоже содержит МОП-структуры (структуры металло-

Рис. 10. Принцип работы ПЗС-матрицы:
1 – фотодиод; 2 – свет, 3 – запоминающий электрод, 4 – сдвигающий затвор, 5 – передающий электрод, 6 – оптический экран



оксидных полупроводников). КМОП-матрицы существенно отличаются от ПЗС-матриц не только технологией изготовления, но и рядом особенностей.

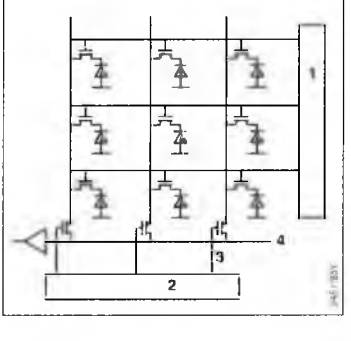
Пикселы здесь считываются не последовательно, а по аналогии с ячейкой памяти в оперативном запоминающем устройстве, могут активироваться по-отдельности, так как расположены в матричной структуре. С этой целью для каждого пиксела также интегрирована активная электроника (APS, активный датчик пиксела).

Интегрирующие фотодиоды не используются; вместо них используются те, что в большой степени не зависят от времени выдержки.

Значения яркости не пропорционально преобразуются в электрические сигналы, а логарифмируются. Поэтому они имеют схожую характеристику с человеческим глазом. Только это позволило увеличить динамическую реакцию «светлый/темный» до более чем 100 дБ без дополнительных мер.

КМОП-матрицы реализуются не на основе стандартной КМОП-технологии. Вместо этого используется КМОП-технология, оптимизированная до фотоэлектрического элемента, который, благодаря гораздо меньшей потребляемой мощности, чем у ПЗС-матриц, позволяет добавлять на матричный чип другую активационную и оценочную электронику.

Рис. 11. КМОП-матрица
Фотодиодная матрица с одним фотодиодом и одним активационным транзитором на каждый пиксел:
1 – адресация строк; 2 – адресация столбцов; 3 – выбор столбцов; 4 – линия сигнала столбцов



Поскольку время доступа к отдельным пикселам составляет порядка нескольких десятков нс, КМОП-матрицы допускают несколько более высокую частоту смены кадров, особенно при использовании возможности считывания только фрагментов изображения (субфрейминг), чего не позволяют сделать ПЗС-матрицы.

На рис. 11 показан фрагмент структуры КМОП-матрицы. Отдельный пиксел состоит из фотодиода и канального полевого униполярного МОП-транзистора (MOSFET) в качестве переключающего элемента. Каждый пиксел можно индивидуально активировать и считывать с него сигналы через матричную структуру.

Все фотодиоды заряжаются до противодействующего напряжения смещения величиной около 5 В. Отдельные пикселы разряжаются до определенного напряжения под влиянием падающего света. Сигнал пиксела считывается путем активации соответствующих формирователей строк и столбцов, в результате чего создается проводное соединение от пиксела к выходному усилителю. Затем пиксел снова заряжается через это соединение до исходного противодействующего напряжения. Усилитель измеряет необходимый заряд для каждого пиксела. Это точно соответствует фотозаряду, накопленному пикселом. Таким образом, каждый пиксел можно считывать индивидуально, а время выдержки можно определить через внешнюю схему выборки адреса.

Эта APS-технология, при которой в матрицу интегрируется транзистор MOSFET, обеспечивает низкий уровень шумов. Самый простой пиксел APS состоит из фотодиода и трех MOSFET. На рис. 12 схематично изображена структура пиксела HDRC (КМОП – технология с расширенным динамическим диапазоном). Светочувствительным элементом этого варианта КМОП-матрицы является фотодиод, поляризованный в направлении блокировки, последовательно соединенный с р-канальным МОП-транзистором (М1), работающим ниже напряжения открывания. Диодный ток, пропорциональный освещенности, также должен протекать через блокированный транзистор. Напряжение его истокового перехода U_{GS} в широком диапазоне практически идеально логарифмически зависит от протекающего фототока. Два других транзистора М2 и М3 служат для развязки сигнала, подаваемого через мультиплексор на быстрый 10-битный аналого-цифровой преобразователь.

Технология определения дальности

Формирователи изображений для определения дальности – это датчики, все еще находящиеся на стадии разработки, сочетающие характеристики лидаров и видеокамер. Их можно считать видеодатчиками с дополнительной функцией измерения расстояния до ближайшего объекта каждым пикселом камеры. Наиболее известной технологией в современном автомобилестроении является фотонное смешивающее устройство (PMD).

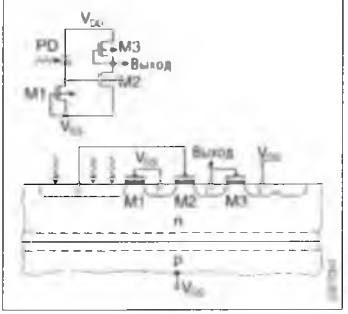
Находящийся перед автомобилем объект подвергается модулированному облучению светодиодами в диапазоне, близком к инфракрасному. Для принятого фоточувствительным датчиком сигнала также оценивается время его распространения. Это создает трехмерное изображение окружающей автомобиль обстановки. Если все еще существующие проблемы можно преодолеть, то технологию PMD следует рассматривать как серьезную альтернативу другим датчикам в коротком и среднем диапазонах дальности.

Список литературы

[1] Jaehne, B.: (Ред.) Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 1. Academic Press, 1999

[2] Knoll, P. M.: Ch. 7.8 in: Marek, J.; Trah, H.-P.; Suzuki, Y; Yokomori, I.: Датчики для автомобильной технологии. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

***Рис. 12.** Схема пиксела HDRC в разрезе:*
PD – фотодиод; M1, M2, M3 – транзисторы



Мехатроника

Мехатронные системы и компоненты

Определение

Термин «мехатроника» появился в результате слияния механики и электроники, где электроника означает «аппаратную часть» и «программное обеспечение», а механика – общее понятие для дисциплин «машиностроение» и «гидравлика». Вопрос не в том, чтобы заменить инженерную механику «электронификацией», а в том, чтобы разработать синергетический подход и методологию проектирования. Цель – достижение синергетической оптимизации машиностроения, электронных устройств и программного обеспечения для проектирования еще большего количества функций при низких затратах, меньшей массе и меньшем занимаемом пространстве и при более высоком качестве.

Ключевым фактором успеха мехатронного подхода к решению проблем является рассмотрение двух прежде отдельных дисциплин как одного целого.

Применение

Мехатронные системы и компоненты теперь используются практически во всех аспектах автомобилестроения, начиная от управления двигателем и впрыска топлива в двигателях с искровым зажиганием, и дизельных двигателях управления переключением трансмиссии, и управления электрической и тепловой энергией до широкого спектра тормозных систем, и систем динамической стабилизации. Сюда даже относятся коммуникационные и информационные системы, со множеством разных требований. Наряду с системами и компонентами мехатроника играет все более важную роль в области микромеханики.

Примеры на уровне системы

Общей тенденцией является появление систем для полностью автоматического управления автомобилем. В будущем механические системы будут все больше заменяться системами «x-by-wire», т.е. электронными. Одной из систем, существующих уже довольно долгое время, является «drive-by-wire», т.е. электронное управление дроссельной заслонкой. Система Brake-by-wire заменяет механическую и гидравлическую связь между педалью и тормозом колеса. Датчики определяют желание водителя затормозить и передают эту информацию на электронный блок управления (ЭБУ). Затем ЭБУ создает необходимое тормозное усилие на колесах посредством исполнительных механизмов.

Возможным вариантом реализации системы Brake-by-wire является электрогидравлическая тормозная система (SBC). При нажатии педали тормоза или вмешательстве системы динамической стабилизации (ESP) ЭБУ SBC вычисляет необходимое тормозное давление для каждого колеса. Поскольку электронный блок вычисляет необходимое тормозное давление отдельно для каждого колеса и по-отдельности определяет фактические значения, он может также регулировать тормозное давление на каждом колесе через модуляторы давления. Каждый из четырех модуляторов давления состоит из впускного и выпускного клапанов, управляемых электронными выходными каскадами, которые вместе обеспечивают точную регулировку давления.

В системе с общей напорной магистралью (дизельный двигатель) нагнетание давления и впрыск топлива отделены друг от друга. Аккумулятор высокого давления, т.е. общая напорная магистраль, накапливает давление топлива, необходимое для каждого рабочего режима двигателя. Форсунка, управляемая электромагнитным клапаном со встроенным соплом, выполняет функцию впрыска топлива прямо в камеру сгорания каждого цилиндра. Электроника двигателя постоянно запрашивает данные о положении педали газа, скорости вращения, рабочей температуре, расходе всасываемого воздуха и давлении в магистрали для оптимизации управления дозированием топлива в зависимости от режима работы.

Примеры на уровне компонентов

Топливные форсунки – важнейшие компоненты при определении будущего потенциала технологий для дизельных двигателей. Форсунки с общей топливной магистралью являются отличным примером того, что очень высокой степени функциональности и, в конечном итоге, удовлетворения клиентов можно добиться только путем контроля всех физических областей (электродинамики, механики, гидродинамики), воздействующих на эти компоненты.

Автомобильные CD-приводы подвергаются особенно жестким условиям эксплуа-

тации. В дополнение к широким диапазонам температур, они должны выдерживать экстремальные вибрации, критически влияющие на такие высокоточные системы. Приводы обычно оснащаются системой упругой амортизации для изоляции блока воспроизведения от вибраций, возникающих при движении автомобиля. Любые стремления уменьшить вес и монтажное пространство CD-приводов сразу вызывают требования улучшения этих систем упругой амортизации. Если система амортизации CD-привода отсутствует, основной акцент делается на проектировании механической системы с нулевыми зазорами и обеспечении дополнительного усиления и отслеживающих контроллеров на высоких частотах. Лишь путем рассмотрения обеих мер с точки зрения мехатроники можно прийти к оптимальному решению по защите от вибрации в автомобиле. В дополнение к снижению массы примерно на 15 % необходимо также уменьшить монтажную высоту примерно на 20 %.

Новый мехатронный подход для электроприводов вентиляторов радиатора системы охлаждения двигателя основан на использовании бесщеточных, электронно коммутируемых двигателей постоянного тока. Изначально, они более дороги (двигатель с электроникой), чем старые, оснащенные щетками. Однако общая оптимизация имеет положительный эффект: бесщеточные двигатели постоянного тока можно использовать в качестве двигателей с «мокрым» ротором с гораздо более простой конструкцией. Это уменьшает количество отдельных деталей примерно на 60 %. Говоря в целом, более прочная конструкция имеет вдвое больший срок службы, почти вдвое меньший вес, примерно на 40 % меньшую общую длину, в то же время поддерживая затраты на сравнимом уровне.

Примеры в области микромеханики

Еще одной областью применения для мехатроники являются микромеханические датчики, с достойными упоминания примерами, такими как пленочные термоананемометры и датчики скорости вращения вокруг вертикальной оси.

Конструкция микросистем также требует междисциплинарного подхода в связи с тесным взаимодействием между подсистемами, с отдельными дисциплинами, такими как механика, электростатика, гидродинамика (где необходимо) и электроника.

Методология разработки

Моделирование

Особые проблемы, с которыми проектировщики сталкиваются при разработке мехатронных систем, являются сокращение времени разработки и усложнение систем. В то же время крайне важно, чтобы в результате разработок создавались полезные продукты.

Сложные мехатронные системы состоят из большого количества компонентов из широкого спектра областей: гидравлики, механики и электроники. Взаимодействие между этими областями – решающий фактор, определяющий функционирование и эффективность всей системы. Модели требуются для проверки ключевых проектных решений, особенно на ранних стадиях разработки, когда еще нет прототипа.

Простейшие вопросы можно зачастую прояснить путем создания относительно простых моделей компонентов. Если требуется большая детализация, то нужны более подробные модели компонентов. Подробные модели фокусируются в основном на конкретной физической области.

В результате появились подробные гидравлические модели форсунок системы Common Rail. Они моделируются с помощью специальных программ, алгоритмы которых точно соответствуют гидравлическим системам. Например, здесь требованием могло бы быть принятие во внимание кавитации.

Подробные модели также требуются для проектирования силовой электроники для активации действия форсунок. Опять же, это подразумевает использование инструментов моделирования, которые должны разрабатываться для проектирования конкретных электрических цепей.

Инструменты, специально предназначенные для этой части системы, также должны обеспечивать разработку и моделирование программного обеспечиния блоков управления ТНВД и силовой электроникой с помощью сигналов датчиков.

Поскольку компоненты системы взаимодействуют между собой, недостаточно рассматривать отдельные подробные модели компонентов изолированно. Оптимальное решение – учитывать модели других компонентов системы. В большинстве случаев эти компоненты могут быть представлены

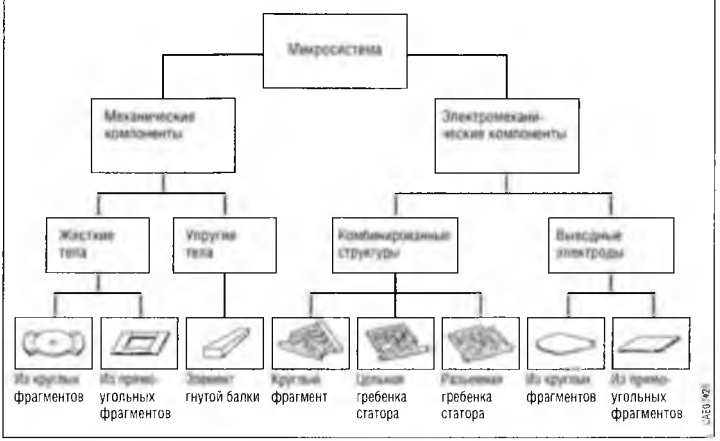
гораздо более простыми моделями. Например, для моделирования системы фокусированием на гидравлике, требуется простая модель силовой электроники.

Применение различных инструментов моделирования, адаптированных к конкретным областям при проектировании мехатронных систем, эффективно только при наличии поддержки по обмену моделями и параметрами между инструментами моделирования. Прямой обмен моделями очень проблематичен из-за того, что при описании моделей каждого из инструментов используются разные языки.

Однако анализ типичных компонентов в мехатронных системах показывает, что они могут состоять из нескольких простых элементов, адаптированных к конкретным областям. К этим стандартным элементам, например, относятся:
- в гидравлике: дроссель, клапан или трубопровод;
- в электронике: резистор, конденсатор или транзистор;
- в механике: масса тела с трением, трансмиссия или сцепление (соответственно, для микромеханики).

Предпочтительным решением является хранение этих элементов в центральной стандартной библиотеке моделей (рис. 1), доступ к которой осуществляется также и децентрализованно. Ядром библиотеки моделей является документация всех стандартных элементов. Для каждого элемента она содержит:
- текстовое описание физического поведения;
- физические уравнения, параметры (например, проводимость или проницаемость) и переменные состояния (например, ток, напряжение, магнитный поток, давление);
- описание соответствующих интерфейсов.

Рис. 1. Библиотека моделей для микромеханического датчика скорости вращения вокруг вертикальной оси



V-модель

V-модель содержит взаимосвязи между различными этапами разработки продукта, от определения требований и реализации до испытаний и внедрения системы (рис. 2). На стадии разработки проект проходит три уровня:

- функции, учитывающие специфику заказчика;
- система;
- компоненты.

Сначала на каждом уровне нужно сформулировать требования («что?») в виде спецификаций (рис. 3). Затем они используются для создания проектных спецификаций на основании проектных решений. Характеристические спецификации описывают, «как» можно выполнить требование. Характеристические спецификации создают основу для описания модели, что позволяет проверять правильность каждого этапа проектирования вместе с определенными ранее контрольными примерами. Эта процедура проходит все три этапа и, в зависимости от применяемых технологий, в каждой соответствующей области (механика, гидравлика, гидродинамика, электрика и электроника, программное обеспечение).

Рекурсии на каждом уровне проектирования значительно сокращают стадии разработки. Моделирование, быстрое создание прототипов и одновременное проектирование – инструменты, позволяющие осуществлять оперативную проверку и создающие условия для сокращения циклов создания продукта.

Рис. 2. Общий обзор V-модели



Перспективы

Движущей силой в мехатронике является постоянный прогресс. Прогрессу в мехатронике способствуют компьютерные технологии в виде все более мощных компьютеров в стандартных областях применения. Соответственно, имеется огромный потенциал дальнейшего роста уровней безопасности и комфорта автомобилей и дальнейшего уменьшения токсичности выхлопа и расхода топлива. Инженеры также сталкиваются с новыми проблемами при внедрении новых технологий для этих систем.

Даже в случае сбоя будущие системы «X-by-wire» должны быть способны продолжать выполнять предусмотренные функции без перехода на аварийный режим с включением механики или гидравлики. Условием их реализации является высоконадежная мехатронная архитектура, требующая «простой» проверки безопасности. Это влияет и на отдельные компоненты, и на передачу энергии и сигналов.

Наряду с системами «x-by-wire» еще одной областью, в которой можно достичь значительного прогресса путем систематического внедрения мехатронных систем, являются системы повышения безопасности при движении (DAS) и их человеко-машинные интерфейсы.

Подходы к проектированию мехатронных систем должны демонстрировать целостность в нескольких аспектах:

- вертикальный: «нисходящий» анализ, начиная с моделирования системы с целью общей оптимизации до моделирования конечных элементов для детального понимания, и «восходящее» проектирование, начиная с испытаний компонентов и заканчивая испытанием всей системы;
- горизонтальный: «одновременное проектирование» сразу в нескольких дисциплинах;
- через корпоративные границы: постепенно внедряется концепция «виртуального образца».

Еще одной проблемой является обучение для стимулирования междисциплинарного подхода и разработки подходящих DE-процессов и форм организации и коммуникаций.

Рис. 3. Рекурсивная методология на одном уровне



Управление климатом в салоне

Требования к управлению климатом

Система для управления климатом в салоне легковых и грузовых автомобилей должна выполнять множество функций. В первую очередь, она должна создавать приятный климат для всех пассажиров. Для этого в салон подается охлажденный или подогретый воздух (в зависимости от температуры наружного воздуха) для удовлетворения психологических потребностей пассажиров. Еще одна функция системы управления климатом – защита салона от неприятных запахов и вредных веществ.

Система управления климатом также выполняет функцию, имеющую отношение к безопасности (должны соблюдаться требования законодательств разных стран) – предотвращение запотевания и обледенения ветрового и боковых стекол.

Требования к комфорту и, соответственно, функциям системы управления климатом обычно растут с повышением категории автомобиля. Необходимо также учитывать региональные требования к системам управления климатом. Например, в Европе предпочитают автомобили с более комфортной работой климат-контроля, а в США предпочтителен ощутимый поток холодного воздуха.

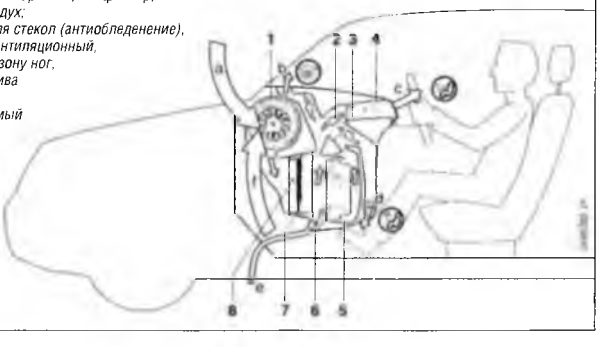
Конструкция и принцип работы кондиционера

Забор воздуха

Кондиционер устанавливается так, чтобы быть невидимым для пассажиров, под панелью приборов. Наружный воздух обычно всасывается в основании ветрового стекла (рис. 1). Дождевая вода и снег удаляются по пути в кондиционер. Наружный воздух всасывается радиальным вентилятором и подается по трубопроводу через отверстие в перегородке моторного отсека. Имеется также возможность рециркуляции воздуха через второй тракт впуска. Соотношение свежего и рециркулируемого воздуха регулируется заслонками.

Свежий воздух необходим для обеспечения пассажиров кислородом. В режиме рециркуляции салон защищается от неприятных запахов и загрязнений. Кроме того, в режиме рециркуляции значительно сокращается энергопотребление, так как воздух не требуется подогревать или охлаждать, как в режимах обогрева и охлаждения салона. Однако иногда для предотвращения запотевания стекол из-за конденсации пара используется холодный и, следовательно, сухой свежий воздух.

Рис. 1. Управление климатом в салоне:
1 – вентилятор, 2 – вентиляционные заслонки; 3 – смешивающая заслонка; 4 – воздуховод;
5 – электронагревательный элемент (термистор с положительным температурным коэффициентом);
6 – радиатор; 7 – испаритель; 8 – фильтр;
a – наружный воздух;
b – воздуховод для стекол (антиобледенение),
c – воздуховод вентиляционный,
d – воздуховод в зону ног,
e – трубка для слива конденсата,
f – рециркулируемый воздух



Очистка воздуха

Для очистки воздуха используются высокоэффективные, предпочтительно прямоугольной формы, фильтрующие элементы, устанавливаемые перед и за вентилятором кондиционера. Фильтрующий элемент, в основном, располагается таким образом, чтобы фильтровать не только наружный, но и рециркулируемый воздух. Фильтрующий элемент имеет ограниченную задерживающую способность и поэтому должен периодически заменяться. В волокна фильтра можно добавить слой активированного угля (гибридный фильтр), чтобы отфильтровывать частицы пыли и другие загрязняющие вещества.

Воздушное охлаждение

Затем очищенный воздух охлаждается на поверхности испарителя, который сегодня обычно полностью изготаливается из алюминия. Воздух рассеивает свою энергию пропорционально испаряющемуся хладагенту, проходящему через испаритель.

Поскольку холодный воздух может поглотить меньше влаги, чем теплый, по мере охлаждения воздуха из него выделяется вода и направляется вниз вдоль испарителя. Вода скапливается в поддоне под испарителем и сливается из кондиционера в атмосферу через конденсатную трубку.

Регулирование и распределение температуры воздуха

После испарителя нужная температура воздуха устанавливается системой регулирующих заслонок. Для этого воздух полностью или частично направляется через радиатор (по которому протекает охлаждающая жидкость системы охлаждения двигателя при температуре до 100 °С) или, в режиме чистого охлаждения – мимо радиатора прямо в салонные воздуховоды. Воздух плавно распределяется по двум каналам с помощью одной или более регулирующих заслонок. Потоки холодного и теплого воздуха смешиваются таким образом, чтобы покрыть потребности в воздухе в находящейся далее смесительной камере и обеспечить комфортные ощущения «голова в холоде, а ноги в тепле». Для этого воздух выдувается через три основных уровня с разными температурами – «зона ног», «вентиляция» (через воздуховоды в панели приборов) и «окна», при этом создается разброс температур до 15 К.

Объем воздуха, выдуваемого из отдельных воздуховодов, плавно регулируется вручную или заслонками с электроприводом.

На последующих этапах расширения системы кондиционирования могут быть предусмотрены воздуховоды для задних пассажиров либо может быть организована раздельная регулировка температуры передней и задней частей салона. Первая ступень расширения – двухзонная независимая регулировка температуры для водителя и переднего пассажира. При трехзонном управлении климатом дополнительно выделяется зона заднего ряда сидений, а при четырехзонном – индивидуальная регулировка для водителя, переднего пассажира и двух задних.

Новшеством является индивидуальная адаптация температуры в зоне ног, или «регулируемая стратификация». В этом случае может быть повышена выходная температура в зоне ног при неизменной базовой регулировке (например, для людей, ноги которых слишком чувствительны к холоду).

Электронагреватель

В современных ДВС с оптимизированным расходом топлива отбираемого охлаждающей жидкостью у ДВС тепла становится меньше, соответственно, становится меньше тепла и в контуре системы отопления. В этом случае в воздушном тракте после радиатора устанавливается электронагреватель с положительным температурным коэффициентом (ПТК). При использовании керамических нагревательных элементов с ПТК электронагреватель автоматически уменьшает свою тепловую мощность при определенной пороговой температуре, поскольку резко возрастает сопротивление элементов в ПТК. Поэтому электронагреватель с ПТК внутренне безопасен.

В настоящее время рассматривается возможность использования других источников тепла, таких как, например, рекуперация тепла из отработавших газов.

Воздушные каналы

Воздух отрегулированной температуры направляется по пластмассовым воздуховодам к определенным выпускным соплам. Выпускные сопла в зоне ног и для обдува стекол не регулируются. Направление и объем воздушного потока можно индивидуально регулировать заслонками на выпускных соплах воздуховодов.

Дополнительные кондиционирующие блоки

В автомобилях представительского класса для задних пассажиров иногда используются отдельные кондиционирующие блоки.

Они выполняются либо как основные блоки, работающие на обогрев и охлаждение, либо как блоки, работающие чисто на охлаждение, и обычно на них подается рециркулируемый воздух. Дополнительные кондиционирующие блоки устанавливаются, к примеру, в центральной консоли, над арками задних колес, в нише для запасного колеса или за задним сиденьем.

Альтернативные концепции кондиционирующих блоков

Описанные выше кондиционирующие блоки устанавливают желаемую температуру путем смешивания холодного и теплого воздуха и являются на сегодня стандартным решением. Могут использоваться альтернативные концепции кондиционирующих блоков, в которых воздух после испарителя проходит непосредственно через радиатор. Для непрерывной регулировки потока охлаждающей жидкости, проходящей через радиатор, и, соответственно, нагрева воздушного потока можно использовать клапан. Необходимость в системе заслонок для смешивания холодной и теплой охлаждающей жидкости отпадает.

Из-за тепловой инерции заполненного охлаждающей жидкостью алюминиевого радиатора необходимые изменения температуры воздуха на выходе могут производиться лишь медленно. Для обеспечения быстрого охлаждения салона максимальной воздушной массой, в этих концепциях обычно используется дополнительный обходной тракт мимо радиатора.

Преимуществом этой концепции является чуть более компактная конструкция кондиционирующего блока и возможность перекрывания радиатора со стороны охлаждающей жидкости, предотвращающие нежелательный нагрев воздуха в режиме охлаждения горячими деталями кондиционера. Недостатком являются затраты на встраивание крана.

Регулирование системы управления климатом

Управление климатом в салоне осуществляется через регуляторы на рабочем блоке кондиционера путем регулировки воздуховодов и (в более дорогих автомобилях) – с помощью различных датчиков. Управление может быть с прямой механической активацией с использованием боуденовских тросиков и гибких валов, а также полностью автоматическим, с процессорным управлением, где нужно лишь задать температуру.

Регулируемыми переменными являются температура на выходе, скорость воздушного потока, влажность воздуха и распределение воздуха по отдельным воздуховодам. Вторичными переменными являются температура в салоне, в т.ч. послойное распределение температуры, расход воздуха, уровень шума на каждом сиденье, и степень запотевания стекол.

Большинство людей считают приятными следующие конфигурации: в летнем режиме – холодный воздух из воздуховодов в панели приборов; в зимнем режиме – теплый воздух из нижних и верхних воздуховодов (для предотвращения запотевания и обледенения стекол). А в переходном режиме воздух с отрегулированной температурой выходит в регулируемых пропорциях из верхних, нижних и фронтальных воздуховодов в салоне. В автоматическом кондиционировании воздуха могут играть роль и дополнительные факторы. Солнечные датчики могут определять состояние и интенсивность солнечного излучения и эти переменнные могут использоваться в управлении. Датчики качества воздуха определяют наличие загрязняющих веществ и неприятных запахов, которые могут появиться в окружающей среде, и предотвращают их проникновение в салон посредством закрывания впусков наружного воздуха. Датчики влажности для ветрового стекла позволяют предпринять меры по предотвращению запотевания стекол. Желаемая температура в салоне сравнивается с фактической с помощью датчиков температуры.

Системы управления климатом

Отопительный контур

Отводимое двигателем тепло является источником энергии, которую можно без больших затрат использовать для отопления салона. Горячая охлаждающая жидкость течет через радиатор в кондиционере. Воздух, проходящий через радиатор, нагревается.

Для поддержания температуры в салоне зимой после поездки и выключения двигателя можно использовать электроприводную помпу, перекачивающую охлаждающую жидкость и позволяющую использовать тепло, аккумулированное в системе охлаждения.

Контур хладагента

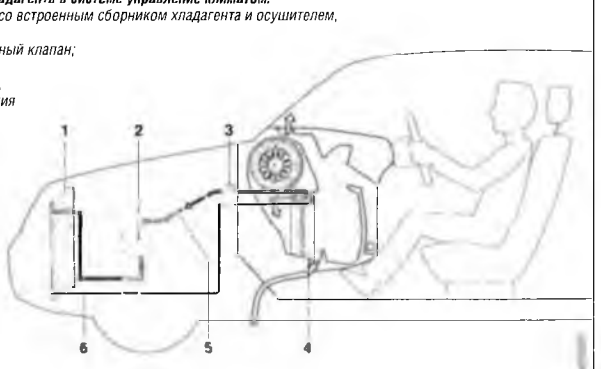
Функция контура хладагента состоит в поглощении тепловой энергии охлаждаемого в испарителе воздуха и рассеянии ее в атмосферу в другой точке, вне салона. Это делается по принципу холодных потерь в замкнутом контуре хладагента (рис. 2). Основные компоненты этой цепи – испаритель с расширительным клапаном в кондиционере, конденсатор в передней части автомобиля, обычно устанавливаемый прямо перед радиатором системы охлаждения, и компрессор, монтируемый на двигателе и приводимый от коленчатого вала.

Компоненты соединяются металлическими трубками, которые могут содержать гибкие секции для разъединения. Компрессор вытягивает газообразный хладагент из испарителя и сжимает его, т.е. давление и температура сильно увеличиваются. В конденсаторе горячий хладагент рассеивает тепло в окружающий воздух, протекающий через конденсатор. При этом охлаждении газообразный хладагент конденсируется. Если воздушного потока не хватает для достаточного охлаждения хладагента, то вентилятор радиатора увеличивает скорость воздушного потока через конденсатор. Хладагент, теперь уже в жидкой форме и под высоким давлением, распыляется в расширительном клапане и направляется в испаритель. Давление резко падает, в результате чего хладагент, испаряясь, сильно охлаждается и поглощает теплоту охлаждаемого кондиционером воздуха.

Испарившийся хладагент выходит из испарителя в газообразном виде и снова проходит через расширительный клапан, который, в зависимости от давления и температуры имеющегося хладагента, изменяет поперечное сечение на стороне впуска, чтобы в испаритель впрыскивалось ровно столько хладагента, сколько может испариться в текущем режиме работы.

Холодный газообразный хладагент снова затягивается компрессором, и циркуляция возобновляется.

Рис. 2 Контур хладагента в системе управления климатом:
1 – конденсатор со встроенным сборником хладагента и осушителем,
2 – компрессор;
3 – расширительный клапан;
4 – испаритель,
5 – линия впуска,
6 – напорная линия



Для предотвращения обледенения с воздушной стороны испарителя, что могло бы уменьшить сечение воздуховода в испарителе, минимальная температура воздуха не должна опускаться ниже 0 °С. Для измерения температуры воздуха после испарителя либо используется датчик температуры воздуха, соответственно регулирующий работу компрессора при падении температуры ниже определенного уровня, либо в компрессоре ограничивается минимальное давление на впуске и, соответственно, температура испарителя. Выходную мощность можно регулировать от 0 кВт (хладагент не течет через испаритель) до максимальной, около 8 кВт (максимальный объем хладагента и поток воздуха).

В настоящее время в качестве хладагента используется фторуглерод 1,1,1,2-тетрафторэтан (торговое наименование R134a). Поскольку показатель GWP (потенциал глобального потепления) этого хладагента составляет около 1400, а предписание, вступившее в силу в Европе в 2011 году для новых автомобилей, регламентирует показатель GWP менее 150, будет использоваться альтернативный хладагент, по крайней мере в ЕС.

Управление климатом в гибридных автомобилях и электромобилях

В автомобилях с функцией «пуск-стоп» необходимо поддерживать климат в салоне постоянным даже при выключенном двигателе. Для отопления можно использовать электроприводную жидкостную помпу, чтобы отбирать остаточное тепло из контура охлаждения двигателя. Для охлаждения разработаны испарители с аккумулятором холода на базе материала, способного аккумулировать холод за счет изменения фазы и снова рассеивать его при остановке на светофоре с выключением двигателя. Таким образом, климат в салоне можно поддерживать на приятном уровне с выключенным двигателем в течение двух минут.

В автомобилях, частично или полностью работающих на электроприводе, используется электрический компрессор. Для отопления возможны два решения. Либо необходимая для радиатора охлаждающая жидкость электрически нагревается и подается в контур электроприводным насосом, либо радиатор заменяется электрическим нагревательным элементом – высоковольтным термистором с ПТК. Электронагреватель и электрический компрессор также открывают возможности для независимого управления климатом. Если аккумуляторная баратея достаточно заряжена или подключена к зарядному устройству, то автомобиль можно предварительно прогреть или остудить.

Поскольку мощность, необходимая для управления климатом, может достигать несколько киловатт, что значительно сокращает запас хода электромобиля, ведущиеся разработки акцентируются на повышении к. п. д. систем управления климатом.

Вспомогательные отопительные системы

Принцип действия и конструкция

Вспомогательные отопительные системы для выработки тепла используют топливо из топливного бака. Для прямого обогрева салона используются нагреватели воздуха (рис. 4). Они передают в салон тепло, создаваемое при работе двигателя. Встроенные нагреватели охлаждающей жидкости (рис. 5, 6, 7) подходят и для предварительного прогрева двигателей, и для отопления салона через теплообменник с вентилятором.

Особенно эффективны нагреватели воздуха, которые благодаря прямой передаче тепла в воздух пригодны для длительного отопления. Нагреватели охлаждающей жидкости используют контур охлаждения двигателя и существующие воздуховоды, и поэтому особенно хорошо подходят для покрытия дефицита тепла у двигателей с низким расходом, и для прогрева салона и двигателей легковых автомобилей.

Дополнительные преимущества вспомогательных отопительных систем:
- отсутствие обледенения стекол, благодаря предварительному прогреву;
- оптимальный комфорт отопления;
- использование спальной кабины грузовика даже зимой;
- меньше износ и вредные выбросы при запуске прогретого двигателя (только нагреватель охлаждающей жидкости);
- быстрее достигается рабочая температура каталитического нейтрализатора (только нагреватель охлаждающей жидкости).

Все более значимым становится их использование в легковых автомобилях с недостаточной теплоотдачей, вызванной ростом эффективности привода за счет электрификации. Особенно в 100% электромобилях отопители, работающие на топливе, из-за их высокой эффективности в преобразовании химически связанной энергии в тепло, не ограничивают запас хода.

Нагреватели воздуха

Области применения

Нагреватели воздуха – наиболее распространенный тип вспомогательного отопителя в грузовиках и автобусах. Их основное преимущество – низкая стоимость, быстрый монтаж и более низкий расход энергии и топлива. Огромные темпы их распространения отмечаются в США, поскольку законодательство запрещает работу двигателя для отопления неподвижного автомобиля, а эти обогреватели могут отапливать салон при явно меньшем расходе топлива.

Принцип работы

Нагреватели воздуха (рис. 4) работают независимо от собственного теплового баланса автомобиля. Вентилятор затягивает из атмосферы воздух, необходимый для сжигания, и гонит его в горелку. Электрический дозирующий насос подает дизельное топливо или бензин через испаритель в горелку, где топливо смешивается с воздухом, воспламеняется свечой предпускового подогрева с закрытым нагревателем и сгорает.

Вентилятор затягивает из атмосферы нагреваемый воздух, продувает его через теплообменник в кабину.

В странах с холодным климатом требуется тепловая мощность около 4 кВт. В странах с умеренным климатом достаточно около 2 кВт.

Важным аспектом безопасности является необходимость полной изоляции воздуха для сжигания и отработавших газов от воздуха в кабине. Это предотвращает проникновение отработавших газов в кабину.

Тепловая мощность регулируется путем изменения количества топлива, воздуха для сжигания и свежего воздуха для обогрева. Если измеренная датчиками температура отличается от заданной органом управления, то мощность нагревателя регулируется, пока снова не будет достигнута нужная температура. Комбинированный датчик регистрирует неприемлемую температуру из-за возникающих дефектов или неисправностей (например, перегрев из-за засорения отопительных воздуховодов) и при необходимости своевременно выключается

Монтаж

Нагреватели воздуха для грузовиков и автобусов обычно можно устанавливать непосредственно в кабине. К примеру, в грузовиках предпочтительные места размещения – в зоне для ног второго водителя, на задней стенке кабины, под спальным местом, на стенке кабины снаружи или в отсеке для хранения. Выхлопная труба всегда проходит под полом (либо в колесную арку, либо через заднюю стенку кабины).

Большинство датчиков в топливных баках легковых и грузовых автомобилей уже имеют разъемы для подачи топлива в обогреватель. При необходимости, устанавливается дополнительный датчик в баке. Должен быть обеспечен резерв топлива для двигателя.

Нагреватели охлаждающей жидкости

Области применения

Для использования в легковых автомобилях предпочтительны нагреватели охлаждающей жидкости мощностью примерно до 5 кВт. Для прогрева двигателя и салона они используют контур охлаждения и существующие теплообменники, поэтому легко модернизируются. Для предпускового прогрева двигателя у грузовиков используются нагреватели мощностью до 12 кВт. Большая площадь кузова и кубатура салона городских и туристических автобусов требуют тепловой мощности до 35 кВт

Основными типами для легковых автомобилей являются вспомогательный и усиливающий отопители. Эти отопители встраиваются прямо в питающую линию контура охлаждения между двигателем и теплообменником салона (рис. 5). Они используют существующие устройства: теплообменник с вентилятором, заслонки и воздуховоды.

Нагреватели для быстрого запуска используются для удовлетворения высоких требований к скорости прогрева; они выходят на полную тепловую мощность примерно через 30 с. Необходимое ускорение испарения топлива достигается путем электрического нагрева испарителя при запуске двигателя.

Вспомогательные нагреватели для предпускового прогрева двигателя и салона

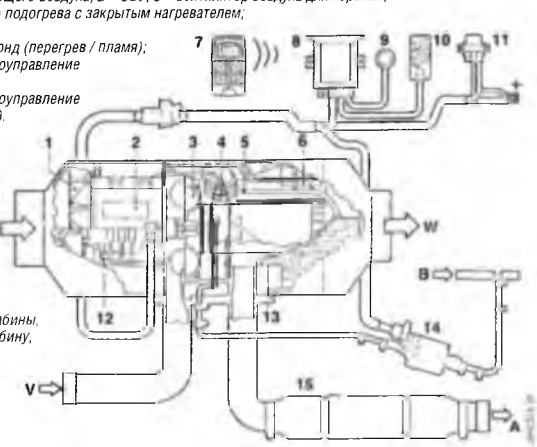
При сжигания топлива выделяется тепло и передается охлаждающей жидкости, текущей между рубашкой и теплообменником (рис. 7) нагревателя.

Самый простой способ интегрировать их в систему охлаждения – последовательно соединить их между двигателем и теплообменником в первичном контуре (рис. 5). Недостатком у двигателей рабочим объемом более 2,5 л является гораздо более медленный прогрев салона

Рис. 4. Нагреватель воздуха:

1 – вентилятор нагревающего воздуха; 2 – ЭБУ; 3 – вентилятор воздуха для горения,
4 – свеча предпускового подогрева с закрытым нагревателем;
5 – теплообменник;
6 – комбинированный зонд (перегрев / пламя);
7 – дистанционное радиоуправление (переносной блок);
8 – дистанционное радиоуправление (стационарный блок).
9 – кнопка,
10 – датчик комнатной температуры,
11 – держатель предохранителей,
12 – электродвигатель,
13 – горелка,
14 – дозирующий насос,
15 – глушитель,

F – свежий воздух из кабины,
W – горячий воздух в кабину,
A – отработавшие газы,
B – топливо,
V – воздух для горения



охлаждающей жидкостью системы охлаждения двигателя. В таких случаях салон можно отапливать в порядке приоритетности вторичным контуром (рис. 6); двигатель прогревается этим вторичным контуром только после открывания термостата при достижении высокой температуры ОЖ. Невозвратный клапан предотвращает обход контура через термостат.

Помпа (рис. 7) во вспомогательных нагревателях подает охлаждающую жидкость на теплообменник, где она нагревается. С одной стороны нагретая охлаждающая жидкость предварительно прогревает двигатель; с другой – собственный теплообменник автомобиля (рис. 5 и 6) рассеивает тепло. Нагретый воздух контролируемо направляется через существующую систему вентиляции в кабину. Работой при ручном управлении и при программировании времени включения и длительности прогрева можно управлять через таймер, дистанционное управление и даже с мобильного или стационарного телефона.

Усиливающие нагреватели для покрытия дефицита тепла в режиме движения

Более эффективные системы привода, такие как турбодизели с небольшим рабочим объемом и гибридные приводы, в силу своего к. п. д. генерируют недостаточно тепла для отопления салона. Для покрытия этого дефицита используются усиливающие нагреватели. Они работают только при наружной температуре ниже +5 °C и при работающем двигателе. Поэтому им не нужна своя помпа.

Рис. 5. Нагреватель охлаждающей жидкости, встроенный в контур охлаждения
(стандартная конструкция)
1 – двигатель; 2 – нагреватель охлаждающей жидкости со встроенной помпой; 3 – автомобильный теплообменник с вентилятором

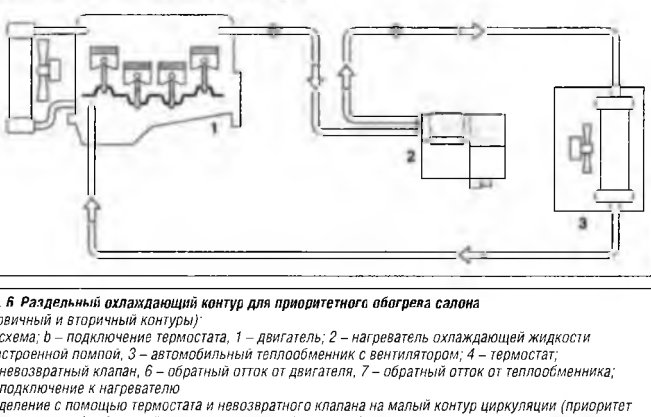
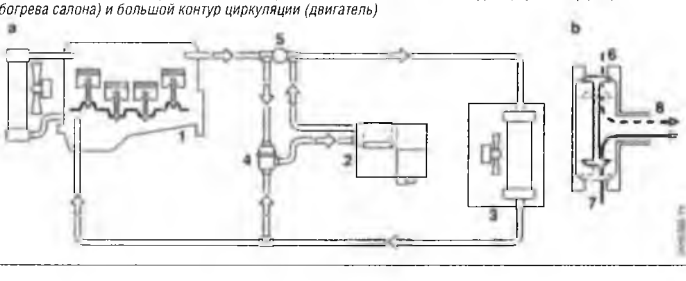


Рис. 6. Раздельный охлаждающий контур для приоритетного обогрева салона
(первичный и вторичный контуры):
a – схема; b – подключение термостата, 1 – двигатель; 2 – нагреватель охлаждающей жидкости со встроенной помпой, 3 – автомобильный теплообменник с вентилятором; 4 – термостат; 5 – невозвратный клапан, 6 – обратный отток от двигателя, 7 – обратный отток от теплообменника; 8 – подключение к нагревателю
Разделение с помощью термостата и невозвратного клапана на малый контур циркуляции (приоритет обогрева салона) и большой контур циркуляции (двигатель)



Усиливающий нагреватель можно модернизировать до вспомогательного посредством модифицирования помпы и замены органа управления на ЭБУ.

При использовании в электромобиле работающий на топливе нагреватель может полностью покрыть потребности в тепле.

Монтаж

Во избежание потерь тепла из-за длинных шлангов для охлаждающей жидкости нагреватели охлаждающей жидкости обычно устанавливаются в моторном отсеке. Ограниченные условия монтажа требуют очень компактной конструкции. Установка упрощается путем встраивания всех компонентов, необходимых для создания и передачи тепла, в нагревательный блок (рис. 7).

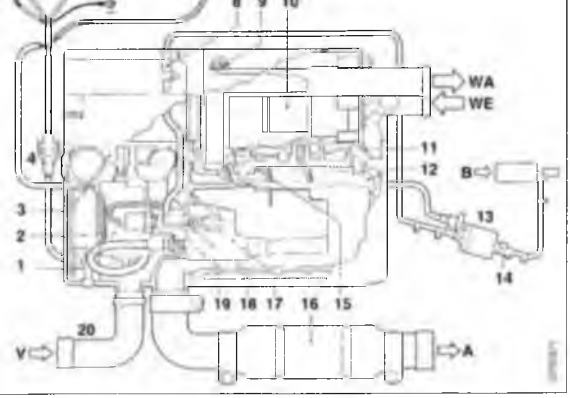
Нормы и правила

Все вспомогательные нагреватели и работающие на топливе усилительные нагреватели сертифицируются согласно Директиве 2001/56/EC. При модификации такого сертифицированного нагревателя, в соответствии с инструкциями изготовителя, не предусматривается никаких проверок экспертами или инспекциями.

Установка вспомогательных нагревателей в автомобилях, используемых для международных перевозок опасных грузов, регламентируется Европейским соглашением ADR (Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов). Из соображений безопасности нагреватель должен выключаться перед въездом в опасную зону (например, на нефтеперегонный завод или автозаправку). Нагрев также автоматически выключается при выключении двигателя или включении вспомогательного оборудования (например, вспомогательного привода откачивающего насоса).

Рис. 7. Нагреватель охлаждающей жидкости:

1 – электродвигатель, 2 – ЭБУ, 3 – вентилятор воздуха для горения, 4 – штекерное соединение; 5 – реле вентилятора; 6 – держатель предохранителей, 7 – мини-таймер, 8 – подвод топлива, 9 – сливной винт, 10 – помпа охлаждающей жидкости; 11 – датчик перегрева; 12 – теплообменник; 13 – дозирующий насос; 14 – фильтр; установленный в дозирующий насос; 15 – датчик температуры, 16 – выхлопная труба с глушителем; 17 – горелка, 18 – элемент накаливания, 19 – датчик пламени, 20 – шланг для подачи воздуха для горения; A – отработавшие газы; B – топливо; V – воздух для горения, WA – выпуск охлаждающей жидкости; WE – впуск охлаждающей жидкости



Системы комфорта и удобства эсплуатации в дверях и потолке

Приводы стеклоподъемников

Автоматические стеклоподъемники в окнах транспортных средств обычно приводятся в действие посредством электрических двигателей. Используются два типа конструкции (рис. 1).

- Рычажный стеклоподъемник: шестерня привода стеклоподъемника входит в зацепление с зубчатым сектором, соединенным с тяговым механизмом. Эта система очень эффективна. С нижней стороны системе требуется большое монтажное пространство, и она тяжелая.
- Стеклоподъемник с тросиком: привод стеклоподъемника вращает катушку с тросиком, управляющим тросиковым механизмом. В передних дверях большей частью используются две направляющих. В задних дверях предпочтительными являются системы с одной направляющей. Ключевым преимуществом этих конструкций является их прекрасная способность направлять стекло в двери.

Рис. 1. Приводы стеклоподъемников:
a – рычажный стеклоподъемник;
b – стеклоподъемник с тросиком;
1 – электропривод стеклоподъемника;
2 – направляющая;
3 – привод;
4 – тяговый механизм;
5 – приводной тросик (боуденовский тросик);
6 – зубчатый сектор

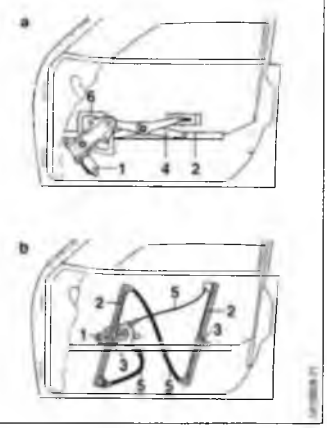
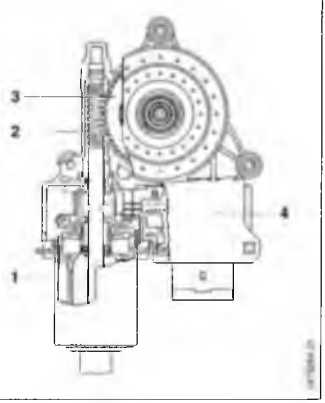


Рис. 2. Привод стеклоподъемника со встроенным ЭБУ:
1 – электропривод стеклоподъемника
2 – червяк;
3 – червячное колесо;
4 – ЭБУ



Электропривод стеклоподъемника

Привод стеклоподъемника состоит из электродвигателя постоянного тока с редуктором (рис. 2). Из соображений комфорта и безопасности многие приводы стеклоподъемников оснащаются ЭБУ. Механизм представляет собой червячную передачу для создания необходимого удерживающего эффекта, предотвращающего случайное открывание окна, самопроизвольное или с применением силы. Специальные трибологические меры и конфигурация магнитного контура электродвигателя еще больше улучшают удерживающие свойства привода. Пространственные ограничения внутри автомобильной двери предполагают применение плоских конструкций приводных устройств.

Гибкая муфта с ограничителем хода способствует эффективному демпфированию в крайних положениях.

Электронный блок управления (ЭБУ)

Используются два режима работы. В ручном режиме управление электроприводом сте-

клоподъемника осуществляется выключателем, нажимаемым по всей длине хода стекла. В автоматическом режиме стекло открывается или закрывается коротким нажатием на выключатель.

Законодательство предписывает наличие устройства, ограничивающего усилие во избежание травм при автоматическом закрывании стекла. В Германии ст. 30 Правил регистрации транспортных средств (StVZO) определяет, что устройство, ограничивающее усилие, должно срабатывать, когда стекло поднимается на уровень от 4 и до 200 мм от верхнего края оконного проема. В электропривод стеклоподъемника встроены датчики Холла для контроля оборотов электродвигателя привода стеклоподъемника (рис. 3). При обнаружении падения оборотов направление вращения электродвигателя сразу же меняется. Система изменяет направление вращения двигателя, если усилие закрытия окна превышает 100 Н при жесткости 10 Н/мм. Чтобы окно закрывалось безопасно, устройство, ограничивающее усилие, автоматически отключается перед тем, как стекло войдет в уплотнитель. Положение стекла контролируется во всем диапазоне его перемещения.

В зависимости от топологии автомобиля, электронное управление можно разместить в центральном ЭБУ или в двери, желательно прямо над электроприводом стеклоподъемника. Децентрализованную электронику можно подключить через шину LIN. Преимуществами такого решения являются диагностика неисправностей электроники и уменьшение количества проводов.

Рис. 3. ***Блок управления стеклоподъемником с электронным ограничителем усилия закрывания:***
1 – микрокомпьютер,
2 – релейный выходной каскад,
3 – команды управления,
4 – подключение через шину CAN,
5 – датчики Холла



Системы люков в крыше

Могут использоваться три типа люков:
- простой люк с подъемно-сдвижной крышкой: крышка люка (часто стеклянная) может приподниматься или сдвигаться назад под крышу;
- большой люк или панорамный люк: в этой системе используются до трех сдвижных приводов с разными вариантами регулировки (например, регулировка стеклянной панели в передней и задней зонах, или система с нерегулируемой стеклянной панелью и электроприводом шторки);
- люк-спойлер: здесь стеклянная крышка приподнимается и затем сдвигается назад над крышей (поэтому и называется «спойлером»).

Электроприводы люков

Люки и шторки регулируются, главным образом, управляющими тросиками, стойками к кручению и давлению, или пластмассовыми зубчатыми планками с мехатронными приводами. Они располагаются в крыше между ветровым стеклом и сдвижной крышкой люка или в задней части автомобиля.

В случае сбоя электрической регулировки люки можно закрыть вручную с помощью рукоятки на приводе.

Привод состоит из электродвигателя постоянного тока с червячным приводом и ЭБУ. Управление обеспечивается посредством импульсов точного положения. В дополнение к точному позиционированию оно может ограничивать усилие во избежание травм при закрывании крышки люка.

Привод активируется внешними сигналами с помощью кнопок, выключателей и аналоговых или цифровых выключателей предварительного выбора.

Система управления может быть встроена в шинную систему (CAN, LIN), и может выводиться диагностическая информация. Электронное управление дает возможность легко реализовать широкий спектр функций, обеспечивающих комфорт и удобство эксплуатации (например, программируемое управление положением, дистанционное закрывание).

Функции для комфорта и удобства эксплуатации в салоне

Электрическая регулировка сидений

С одной стороны, электрическая регулировка сидений обеспечивает большее удобство в эксплуатации, чем механическая, а с другой – она предпочтительнее благодаря меньшему занимаемому пространству и в случае плохой доступности различных уровней регулировки. До десяти электродвигателей могут регулировать:

- высоту подушки сиденья, спереди и сзади;
- продольное положение сиденья
- глубину подушки сиденья;
- наклон спинки сиденья;
- поясничную опору (высоту и кривизну);
- угол наклона плечевой опоры;
- ширину спинки и подушки сиденья;
- высоту подголовника.

Прямой привод

В общей раме нижней части сиденья имеются четыре электродвигателя для механизма регулировки высоты и комбинированного механизма продольной регулировки и регулировки высоты (рис. 1). У простых сидений регулировка глубины подушки невозможна.

Универсальный привод

Универсальный привод состоит из трех идентичных двигателей с четырьмя комплектами механизмов регулировки высоты и двумя комплектами продольной регулировки. Механизмы приводятся в действие с помощью гибких валов. Эта очень адаптируемая система может устанавливаться на сиденьях любой конструкции. С одной стороны, приводы становятся все меньше и меньше. Но с другой – гибкие валы повышают стоимость и вызывают шум, что означает постепенную замену универсальных приводов прямыми.

Интегрированная концепция

Современные конструкции сидений позволяют не только прикреплять поясную ветвь ремня безопасности к раме сиденья, но к спинке сиденья также можно подсоединить и плечевую ветвь вместе с ее устройством регулировки высоты, инерционной катушкой и механизмом натяжения. Эта конструкция сиденья обеспечивает более оптимальное положение ремня безопасности для пассажиров самых разных комплекций и для всех регулируемых положений сиденья. Она вносит важный вклад в обеспечение безопасности пассажира. При этом типе конструкции рама сиденья должна быть усилена, в то время как должны быть усилены и детали рычажных механизмов, и их крепления к раме.

В качестве дополнительной опции обеспечения комфорта предлагаются возможности пневматической и механической регулировки. Они также доступны в варианте для динамичной езды и могут сочетаться с функцией массажа.

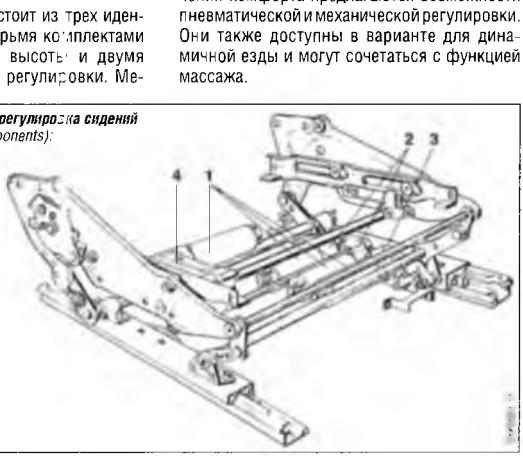


Рис. 1. Электромеханическая регулировка сидений *(источник. Brose Vehicle Components):*
1 – электродвигатели;
2 – механизм продольной регулировки и регулировки высоты,
3 –механизм регулировки высоты;
4 –механизм регулировки глубины подушки сиденья

Дисплеи и органы управления

Каналы обмена информацией

Водители должны обрабатывать постоянно возрастающий поток информации, которая поступает от собственного и других автомобилей, а также от дороги и средств связи. Вся эта информация должна передаваться водителю при помощи хорошо читаемых дисплеев и индикаторных устройств, соответствующих требованиям эргономики.

Визуальный канал – визуальное восприятие информации

Человек воспринимает окружающую обстановку, главным образом, посредством органов зрения (рис. 1). Оценка других участников дорожного движения, их положения, их ожидаемого поведения, дороги и траекторий движения, объектов на ней проводится при помощи органов зрения и имеющихся развитых способностей обработки и анализа изображения; важные факторы выбираются и оцениваются в отношении их важности и прогноза развития при помощи дополнительных способностей мозга.

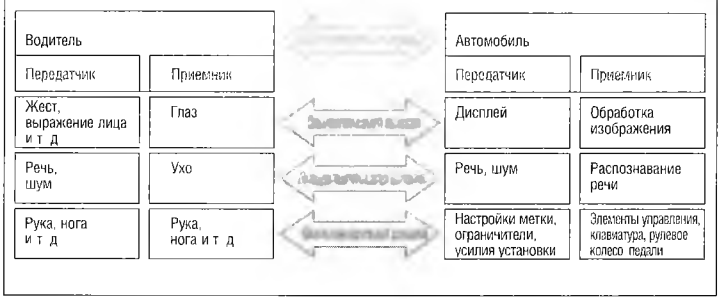
Даже оценка инфраструктуры дорожного движения, в первую очередь, опирается на визуальный канал. Дорожные знаки содержат предписания и указания направления движения, разметка разграничивает полосы движения, указатели направления обозначают изменения направления движения, стоп-сигналы подают предупреждения о транспортных средствах, замедляющих скорость. Поэтому визуальный канал крайне важен при вождении. Это касается и осознанного зрения, когда водитель поворачивает глаза на объект и концентрируется на нем, и периферийного зрения, которое важно для оценки положения транспортного средства на полосе движения. Поэтому следует тщательно оценить с точки зрения влияния на безопасность дорожного движения каждую ситуацию, когда водителю необходимо дополнительно бросить взгляд на дисплей при взаимодействии с информационными системами и системами повышения безопасности или для получения информации от них.

Акустический канал – речь и слух

Для общения с другими участниками движения, в частности, для подачи и восприятия сигналов об опасности, водители и системы повышения безопасности используют акустический канал. Водитель также использует этот канал в собственном транспортном средстве для ввода голосовых команд и получения звуковых и речевых предупреждений и информации от системы повышения безопасности.

Ввод голосовых команд не требует от водителя изменять направления взгляда, но

Рис. 1. Каналы передачи информации между водителем и транспортным средством



занимает часть его внимания. Восприятие информации на слух не требует от водителя изменять направления взгляда, но при этом пространственная и сложная информация (например, описание ситуации на пересечениях дорог) может передаваться в неудовлетворительной форме. Даже водители с нарушениями слуха должны быть способны взаимодействовать с системой повышения безопасности.

Тактильный канал – действия и осязание

Тактильный канал дает водителю обратную связь при всех действиях по управлению двигателем, когда задействованы переключатели, а также при рулении и торможении. Подача предупреждений водителю путем кратковременного затягивания ремней безопасности и вибрации сиденья в случае неизбежности ухода транспортного средства с полосы движения уже внедрена в серийно выпускаемых автомобилях. Имеется также возможность привлечь внимание водителя вибрацией рулевого колеса. Увеличение сопротивления педали акселератора может дополнять подсказку относительно рекомендуемой скорости движения, а изменение усилия на руле, воспринимаемое водителем, может служить подсказкой относительно рекомендуемого изменения направления движения для того, чтобы остаться в пределах полосы движения или совершить маневр уклонения.

Даже кинестетический канал, при помощи которого водитель воспринимает ускорения, уже используется в серийных автомобилях для привлечения внимания водителя, например, путем подачи короткого толчка при торможении.

Тактильный канал постоянно используется при управлении автомобилем, а дополнительные действия (например, набор номера на клавиатуре сотового телефона) могут ухудшить восприятие и контроль.

Контрольно-измерительные приборы

Зоны передачи информации и коммуникации

В автомобиле имеются четыре зоны передачи информации и коммуникации, которые предъявляют различные требования к параметрам соответствующих дисплеев или индикаторных устройств: комбинация приборов, ветровое стекло, центральная консоль и задняя часть салона.

Состав имеющейся и/или необходимой информации определяет то, какая зона коммуникации используется в каждом конкретном случае. Динамическая информация (например, скорость движения) и справочная информация (например, уровень топлива), на которую водитель должен реагировать, выводится на комбинацию приборов как можно ближе к основному полю зрения водителя.

Индикация на ветровом стекле (HUD) идеально подходит для привлечения внимания водителя (например, при подаче сигнала от системы повышения безопасности или при указании маршрута). Индикация на ветровом стекле также пригодна для показа скорости в удобной для восприятия форме. Дополнительно могут подаваться звуковые или речевые сигналы.

Информацию о состоянии автомобиля или более развернутые диалоговые меню (например, для выбора маршрута) желательно помещать на центральный дисплей центральной консоли. Однако, управляющие устройства не обязательно находятся прямо на центральном дисплее; они также могут находиться между передними сиденьям в салоне.

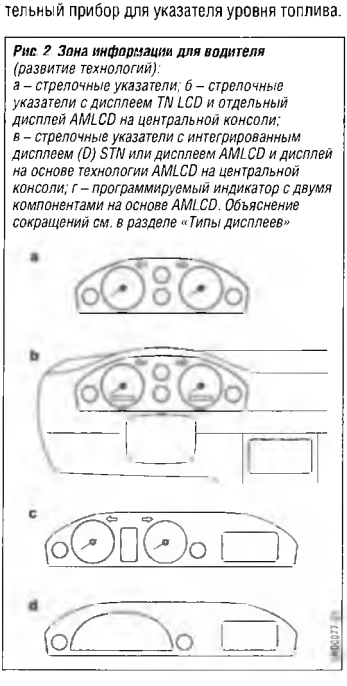
Информация развлекательного характера выводится к задним сиденьям автомобиля, на удалении от основного поля зрения водителя. Также это место идеально для размещения мобильного офиса. Спинка переднего сиденья пассажира является подходящим местом для размещения терминала с портативным компьютером.

«Парный дисплей» или «разделенный дисплей» на центральной консоли устанавливается как дополнительная опция, начиная с 2009 года; такой дисплей показывает различную информацию для водителя и пассажира так, что пассажир может, например, смотреть видео, не отвлекая водителя.

Комбинация приборов

Более старые модели приборов и указателей, предназначенные для визуального показа информации (например, скорость движения, обороты коленчатого вала двигателя, уровень топлива и температура охлаждающей жидкости системы охлаждения двигателя) были сначала заменены более экономически эффективными, лучше освещенными и антибликовыми комбинациями приборов (комбинациями нескольких указателей в одном блоке). С течением времени непрерывный рост объема информации привел к размещению в имеющемся ограниченном пространстве современных комбинаций приборов с несколькими стрелочными измерительными приборами и многочисленными сигнальными лампами (см. рис. 2, а). В этом первом поколении комбинаций приборов использовались индикаторы на основе вихревых токов для спидометра, индикаторы на основе магнитоэлектрической катушки для указателя оборотов коленчатого вала двигателя и тепловой измерительный прибор для указателя уровня топлива.

Рис. 2 Зона информации для водителя *(развитие технологий):*
а – стрелочные указатели; б – стрелочные указатели с дисплеем TN LCD и отдельный дисплей AMLCD на центральной консоли;
в – стрелочные указатели с интегрированным дисплеем (D) STN или дисплеем AMLCD и дисплей на основе технологии AMLCD на центральной консоли; г – программируемый индикатор с двумя компонентами на основе AMLCD. Объяснение сокращений см. в разделе «Типы дисплеев»



Измерительные приборы

Даже сегодня во многих приборах используются механические стрелочные указатели и шкалы (Рисунки 2, b и 2, c). В качестве измерительных приборов, в основном, используются точные шаговые электродвигатели. Благодаря компактной магнитной катушке и (обычно) двухступенчатой передаче с потреблением мощности всего около 100 мВт, эти двигатели обеспечивают быстроту и высокоточное расположение стрелки (рис. 3).

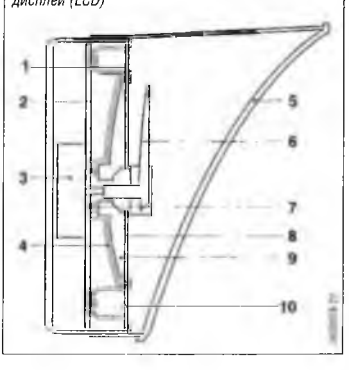
Цифровые дисплеи

Цифровые указатели, устанавливавшиеся до 1990-х годов (например, указатели скорости движения), использовали дисплеи на основе технологии вакуумной флюоресценции (VFD), а позднее – на основе жидких кристаллов (LCD); к настоящему моменту они почти вышли из употребления. Вместо этого используются традиционные аналоговые стрелочные указатели в сочетании с дисплеями. В то же время наблюдается увеличение размеров и разрешающей способности и улучшение цветопередачи дисплеев.

Освещение

Для подсвечивания комбинации приборов в значительной мере использованы предыдущие достижения в области технологий подсветки, благодаря их выигрышному внешнему

Рис. 3. Комбинация приборов *(конструкция):*
1 – светосигнальная лампа; 2 – печатная плата; 3 – шаговый электродвигатель; 4 – отражатель; 5 – прозрачная стенка; 6 – стрелка; 7 – светодиод (LED); 8 – поверхность диска со шкалой; 9 – световод, 10 – жидкокристаллический дисплей (LCD)



виду. Лампы заменены светодиодами (LED), имеющими длительный срок службы. Светодиоды можно использовать как в качестве предупредительных ламп, так и для подсветки шкал, дисплеев и стрелочных указателей (при необходимости, можно использовать с ними пластиковые световоды).

Светодиоды, выполненные по технологии InAlGap, создают высокоэффективное освещение желтого, оранжевого и красного цветов. Последние достижения технологии InGaN обеспечивают значительное улучшение цветопередачи для зеленого, синего и белого цветов. В данном случае белый цвет образуется сочетанием синего светодиодного кристалла с люминесцентным составом, излучающим оранжевый свет (иттриево-алюминиевый состав гранатового цвета).

Цветные жидкокристаллические дисплеи (ЖК-дисплеи), в связи с их весьма низкой светоотдачей (обычно около 60%), требуют применения флуоресцентных ламп с холодным катодом (CCFL) для подсветки с тем, чтобы обеспечить хорошую контрастность при дневном свете. Однако, начиная с 2005 года, их в этом качестве все чаще заменяют белыми ЖК-приборами, благодаря их возросшей эффективности.

Графические модули в блоке приборов

Оснащение транспортных средств надувной подушкой безопасности для водителя и установка усилителя рулевого управления в качестве стандартного оборудования приводят к уменьшению поля зрения водителя. В то же самое время количество информации, которая должна читаться в этом секторе обзора, возрастает. Поэтому возникает необходимость установки дополнительных модулей подачи информации, имеющих графические возможности, а также дисплеев, способных показывать любую информацию в гибкой форме по выбору пользователя. Это приводит к формированию блока приборной панели с использованием традиционных стрелочных указателей, дополненных графическими дисплеями.

Графические модули в комбинации приборов, главным образом, воспроизводят функции, касающиеся водителя и автомобиля, такие как, например, интервалы технического обслуживания, текущего ремонта или проверок, охватывающих поведение автомобиля при эксплуатации, а также автомобильную диагностику, требуемую для ремонтной мастерской. Графические модули также могут отображать поступающую от навигационной системы информацию о направлении маршрута движения (при отсутствии цифрового изображения карты маршрута показываются только символы направления движения в виде стрелок или перекрестков). Первоначально, эти дисплеи были монохромными; в настоящее время, на автомобилях верхнего сегмента рынка они вытесняются цветными дисплеями (как правило, с экранами типа TFT – тонкопленочный транзистор), информация с которых считывается более быстро и легко, благодаря их цветности. Дисплеи типа TFT также используются для имитации аналоговых указателей, начиная с 2005 года (рис. 2, d). В качестве примера можно привести приборную панель автомобилей «Мерседес» S-класса, на которой указатель скорости эмулируется при помощи ЖК-экрана. При переключении на ночной режим появляется видеоизображение указателя, а указатель оборотов двигателя показывается в виде полоски под видеоизображением. Однако, в связи с высокой стоимостью, эта технология будет заменять традиционные технологии лишь постепенно.

Центральный дисплей и органы управления в зоне центральной консоли

С внедрением систем навигации и информации для водителя, стали широко применяться экраны и клавиатуры, которые первоначально устанавливались, в основном, на центральной консоли. В таких системах центральный дисплей и блок органов управления охватывают всю дополнительную информацию от функциональных устройств и информационных компонентов, а в последнее время иногда также и от систем повышения безопасности, таких как, например, функция автоматизированной парковки. Компоненты объединены в единую сеть и, таким образом, поддерживают с водителем и передним пассажиром интерактивную связь.

Первоначально центральный экран устанавливался на центральной консоли, поскольку там было достаточно места. Постепенно производители автомобилей переключились на более эргономически благоприятное решение и стали устанавливать экран в зоне центральной консоли на уровне комбинации приборов (рис. 2, c). На этот центральный экран выводится самая разнообразная информация, например, маршрут движения, коммуникационная информация (телефон, SMS-сообщение, интернет), аудио (радио, цифровые звуковые носители), видео и ТВ, когда автомобиль не движется, климат-контроль и другие данные (дата, время).

Важный момент для всех визуальных дисплеев, в том, чтобы информацию с них можно

было легко считать в пределах основного поля зрения водителя или в непосредственной близости от него, так чтобы водителю не приходилось надолго отрывать взгляд от дороги. Расположение дисплея, которым будет пользоваться и водитель, и пассажир, в верхней части центральной консоли является эффективным как с эргономической, так и с технической точек зрения. На мониторе отображается вся графическая информация. Требования, связанные с воспроизведением телевизионного изображения и данных навигационной системы, определяют разрешение и цветопередачу дисплея.

Формат кадра для центрального дисплея с интегрированной информационной системой был изменен с 4:3 до более широкого формата 16:9, что позволяет выводить на экран дополнительные символы выбора маршрута вместе с картой. Применяется даже формат 8:3, чтобы выводить на экран два изображения одновременно

Типы дисплеев

Дисплей на жидких кристаллах

Жидкокристаллический дисплей (LCD) является пассивным дисплеем, т.к. он сам не излучает свет. Жидкокристаллический состав помещен между двумя стеклянными пластинами (рис. 4). В зоне расположения сегментов дисплея эти пластины покрыты прозрачным токопроводящим слоем, к которому подается напряжение. Между слоями создается электрическое поле, вызывающее переориентацию молекул жидкого кристалла.

Дисплей на жидких кристаллах типа TN

ЖК-дисплеи типа TN (твист-нематический жидкокристаллический дисплей) – это наиболее широко используемый тип дисплея. Термин происходит от скрученной структуры удлиненных жидкокристаллических молекул, расположенных между стеклянными пластинами с прозрачными электродами. Температурные пределы использования – от –40 до 105°C. Время переключения дольше при низких температурах из-за свойств вязкости материала жидких кристаллов.

Слой дополнительной ориентации в ЖК-дисплее обеспечивает единообразную ориентацию молекул жидких кристаллов относительно пограничных поверхностей, что приводит к повороту молекул на 90° в незаряженном состоянии. Это вызывает поворот плоскости поляризации света проходящего через ячейки.

ЖК-дисплеи могут эксплуатироваться как в позитивном контрасте (темные символы на светлом фоне), так и в негативном (светлые символы на темном фоне). В ячейке с негативным контрастом внешние поляризаторы расположены таким образом, что их направления поляризации ориентированы перпендикулярно друг другу. Таким образом, ячейка прозрачна в незаряженном состоянии. В зоне двух противоположных электродов жидкокристаллические молекулы под действием электрического поля выстраиваются в направлении поля. Вращение плоскости поляризации подавляется, и зона дисплея становится непрозрачной.

В ячейке с позитивным контрастом внешние поляризаторы расположены параллельно друг другу. Таким образом, ячейка непрозрачна в незаряженном состоянии и становится прозрачной при подаче напряжения.

Ячейки с позитивным контрастом могут использоваться при подсветке с лицевой или обратной стороны; ячейки с негативным контрастом требуют подсветки с обратной стороны.

Сегменты с раздельным управлением могут использоваться для показа цифр, букв и символов. Жидкокристаллические графические элементы расположены в форме матрицы и активируются индивидуально тонкопленочными транзисторами (TFT); они образуют основу плоских TFT дисплеев.

Технология TN подходит не только для небольших дисплейных модулей, но также и для крупных дисплейных зон в модульных или даже полноразмерных комбинациях приборов на жидких кристаллах.

Растровые дисплеи с графическим изображением необходимы для отображения непрерывно изменяющейся информации. Такие дисплеи имеют строчную развертку и характеризуются мультиплексной передачей сигналов. Мультиплексные свойства TN ЖК-дисплеев имеют ограничения при использовании на автомобиле (в связи с температурными условиями).

Рис. 4. Принцип действия ЖК-дисплея (нематическая ячейка):
1 – поляризатор, 2 – стекло, 3 –слой ориентировки и изоляции, 4 – электрод; 5 –поляризатор, а - зона сегментов



Дисплеи на жидких кристаллах типа STN и DSTN

Для более высоких параметров мультиплексирования при среднем разрешении можно использовать технологии STN (супертвистнематик) и DSTN (двухслойный STN). Молекулярная структура в ячейках этих дисплеев больше скручена, чем в обычных ЖК-дисплеях типа TN. ЖК-дисплеи типа STN допускают только монохромное изображение.

На ЖК-дисплее типа STN выводится черно-белое изображение в широком диапазоне температур с позитивным или негативным контрастом, цветность создается подсветкой цветными источниками света. Многоцветная передача образуется включением красных, зеленых и синих тонкопленочных фильтров, расположенных на одной из двух стеклянных подложек. При использовании на автомобиле можно добиться передачи оттенков серого цвета только в ограниченных пределах. В результате этого гамма цветов ограничена черным, белым, основными – цветами: красным, зеленым и синим, а также производными от основных цветов: желтым, бирюзовым и сиреневым.

При понижении стоимости производства дисплеев по технологии AMLCD, очевидно, они придут на смену ЖК-дисплеев, произведенных по технологии STN и DSTN.

Активно-матричные ЖК-дисплеи

Активно-матричные жидкокристаллические дисплеи (AMLCD) позволяют решить задачу применения визуально усложненного дисплея с быстро изменяющимся изображением, отображающим сложную информацию на комбинации приборов и на центральной консоли, где должен размещаться жидкокристаллический монитор с высокой разрешающей способностью и видеовозможностями. Пиксели управляются посредством тонкопленочных транзисторов (TFT ЖК-дисплей, ЖК-дисплей на тонкопленочных транзисторах). Стало возможным устанавливать на автомобилях дисплеи с диагональю от 3,5 до 8 дюймов с возможностью работы в расширенном температурном диапазоне (от -25 до +85°С). Для программируемых комбинаций приборов планируется использование формата с диагональю до 10 и 14 дюймов с возможностью работы в еще более широком температурном диапазоне (от -40 до +95°С).

Дисплеи на жидких кристаллах на основе TFT состоят из «активной» стеклянной подложки и пластинки с цветофильтровыми структурами с обратной стороны. На активной подложке размещаются электроды элементов растра, выполненные из оксидов индия и олова, металлические проводники строк и столбцов и полупроводниковые структуры. В каждой точке пересечения строки и столбца имеется тонкопленочный полевой транзистор, который вытравливается за несколько шагов маскирования на предварительно нанесенной последовательности слоев. В каждом растровом элементе также формируется конденсатор.

Стеклянная пластинка, расположенная напротив подложки, служит для размещения цветных фильтров и «черно-матричной» структуры, которая улучшает контраст дисплея. Эти структуры наносятся на стекло в несколько операций фотолитографическим способом. Непрерывный противоэлектрод наносится сверху через все точки растра. Цветные светофильтры применяются в виде сплошных полосок (для качественного отображения графической информации) или мозаичных фильтров (которые особенно подходят для видеоизображения).

Индикация на ветровом стекле

Дистанция обзора для традиционных комбинаций приборов составляет от 0,8 до 1,2 м. Чтобы считывать информацию с комбинации приборов, водителю приходится переводить взгляд с дальнего (для наблюдения дорожной обстановки) на ближнее расстояние для наблюдения показаний приборов. Этот перевод обычно занимает 0,3–0,5 с.

Индикация на ветровом стекле (HUD) используется в военной авиации, начиная с 1950-х годов. Индикация такого типа для автомобилей, в упрощенном виде, обычно, для показа цифрового спидометра, в течение многих лет предлагается производителями автомобилей в Японии и США в качестве дополнительной опции; некоторые европейские производители также начали предлагать такую опцию в своих автомобилях.

Изображение проектируется через ветровое стекло в основное поле зрения водителя. Оптическая система позволяет получать изображение на таком расстоянии наблюдения, что глаз человека может оставаться приспособленным к дальнему зрению. Индикация на ветровом стекле позволяет водителю не отвлекаться от дороги, т.е. постоянно отслеживать важные изменения дорожной обстановки. Незачем переводить взгляд на спидометр, т.к. скорость и другая важная информация уже показаны на ветровом стекле

Конструкция

Типичная система индикации на ветровом стекле (рис. 5) включает в себя модуль генерации изображения, световой прибор, блок передачи оптического изображения и «отражатель» передающий изображение в глаза водителя.

В автомобиле отражателем обычно служит ветровое стекло. Для того чтобы избежать раздвоения изображения, вызываемого отражением и от внешней, и внутренней поверхности, ветровому стеклу (или, точнее, пластиковой пленке на безосколочном стекле) придается слегка клиновидная форма. Тогда два изображения, отраженных от пограничных поверхностей, совпадают в поле зрения водителя.

В действительности, изображение генерируется в видеомодуле. Это может быть дисплей или устройство, проецирующее изображение на диффузно отражающую поверхность, например, при помощи сканирующего лазерного луча. Это изображение имеет размер всего около 20–40 мм, но яркость, требуемая для уверенного чтения при дневном свете, составляет более 50 000 кд/м^2, т.е., в 100 раз больше, чем для обычного дисплея.

Это изображение отражается через ветровое стекло в глаза водителя. Для водителя оно оказывается наложенным сверху на картину дорожной ситуации перед автомобилем. Для того чтобы увеличить кажущееся расстояние до изображения, на пути луча можно поставить оптические элементы (рассеиватели, концентрирующие отражатели).

Для монохромной индикации на ветровом стекле со средним объемом информации можно использовать сверхвысококонтрастные ЖК-дисплеи типа TN. В более современных цветных дисплеях используется технология TFT на поликристаллическом кремнии.

Находятся в разработке контактно-аналоговые модули индикации на ветровом стекле, которые, например, проецируют изображение препятствия ниже линии прямой видимости и на виртуальном расстоянии, ниже которого водитель тоже увидел бы это препятствие.

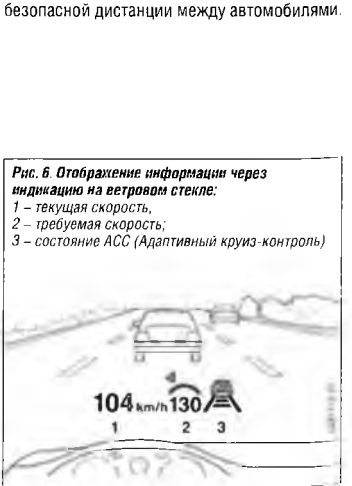
Отображение информации при помощи индикации на ветровом стекле

Виртуальное изображение не должно закрывать и ухудшать картину дорожной ситуации; поэтому оно проецируется в зону с низкой информативностью, иными словами, «над самым капотом» (рис. 6). Чтобы не перегружать водителя информацией в его основном поле зрения, индикация на ветровом стекле должна содержать только необходимый минимум информации, и, следовательно, она является лишь дополнением к обычной комбинации приборов, а не заменой ее. Однако, такая индикация особенно хорошо подходит для показа информации, связанной с безопасностью движения, как, например, предупреждения об опасности или указание безопасной дистанции между автомобилями.

Рис. 5. Индикация на ветровом стекле (HUD) *(принцип).*
1 – виртуальное изображение,
2 – отражение на ветровом стекле;
3 – модуль дисплея: жидкокристаллический дисплей с подсветкой сзади;
4 – оптическая система



Рис. 6. Отображение информации через индикацию на ветровом стекле:
1 – текущая скорость,
2 – требуемая скорость;
3 – состояние ACC (Адаптивный круиз-контроль)



Прием радио- и телесигнала в автомобиле

Беспроводная передача сигнала

Технология беспроводной передачи сигнала позволяет передавать информацию одновременно большому количеству людей. То же самое касается приема радиосигнала в автомобиле во время движения. В настоящее время важность методов передачи цифрового сигнала возрастает. Беспроводные сегменты сети передачи сигнала также используют аналоговые методы передачи сигнала, поэтому разница между двумя технологиями несущественна.

Радио и телевизионная трансляция

Беспроводная трансляция радио и телевизионного сигнала используется, главным образом, для передачи к наземным приемникам. В случае передачи аналогового радиосигнала, высокочастотный сигнал модулируется аудиосигналом. Приемник конвертирует принятый высокочастотный сигнал в базовую частоту, а затем демодулирует его. Получаемый после этого конечный сигнал является информационным сигналом.

В сфере телекоммуникаций распространение электромагнитных волн используется для передачи информации, при которой амплитуда, фаза или частота их колебаний изменяется в зависимости от того, какая информация передается. Обычно используется диапазон частот от нескольких килогерц до 100 ГГц. Некоторые из наиболее часто используемых полос частот указаны в табл. 1. Использование полос частот регулируется законодательством (Закон о телекоммуникациях в Германии; 2004). План распределения частот между странами основывается на международных соглашениях, указанных в Статье S5 Нормативных актов по использованию радиочастот ITU (Международный союз по телекоммуникациям; [1]).

Передача информации при помощи высокочастотных волн

Варьирование высокочастотного сигнала, используемое для передачи полезного сигнала от передатчика к приемнику, называется модуляцией. Промодулированный высокочастотный сигнал передается через антенну на точно определенной в узких пределах полосе частот. Приемник точно настраивается на эту полосу частот, выбранную из широкого диапазона частот, которые может принимать антенна. Таким образом, передача колебаний от передатчика к приемнику образует связь в цепи передачи сигнала.

Например, если речь идет о передаче аудиосигнала, полезный сигнал, в отличие от высокочастотного несущего сигнала, состоит из сигналов в широком диапазоне частот до максимальной величины 20 кГц. Высокочастотный несущий сигнал модулируется этим низкочастотным сигналом. Антенна передатчика излучает несущую волну

Таблица 1. Обзор некоторых полос частот, используемых для радио- и телевизионной трансляции

Полосы частот	Длины волн λ (м)	Частоты f (МГц)	Примеры
Длинные волны (ДВ)	≈2 000 – ≈ 1 000	0,148 – 0,283	Аналоговая радиотрансляция
Средние волны (СВ)	≈ 1 000 – ≈ 100	0,526 – 1,606	Цифровая трансляция (DRM)
Короткие волны (КВ)	≈ 100 – ≈10	3,950 – 26,10	
Очень высокие частоты (ОВЧ)	≈ 10 – ≈1	30 – 300	
диапазон 1		47 – 68	ТВ
диапазон 2		87,5 – 108	Цифровая радиотрансляция (DAB),
диапазон 3		174 – 223	Цифровая телевизионная трансляция (DVB-T)
Ультравысокая частота (УВЧ)	≈1 – ≈0,1	3 00 – 3 000	
диапазон 4		470 – 582	ТВ
диапазон 5		610 – 790	Цифровая телевизионная трансляция (DVB-T) Цифровая телевизионная трансляция (DVB-H)
L-диапазон		1453 – 1491	Цифровое аудиовещание (DAB)
Сверхвысокая частота (СВЧ)	≈0,1 – ≈0,01	3 000 – 30 000	
		10 700 – 12 750	Цифровая телевизионная трансляция (DVB-S)

Максимальное расстояние, на котором может приниматься сигнал, а также качество приема зависят, помимо прочих факторов, от частоты. Коротковолновые и длинноволновые передачи имеют очень большую дальность приема, в некоторых случаях межконтинентальную, в то время как передача в диапазоне СВЧ, как правило, ограничивается дальностью прямой видимости.

Принимающая станция демодулирует сигнал. Получившиеся в результате этого низкочастотные колебания преобразуются в акустические колебания при помощи громкоговорителя.

Амплитудная модуляция

Амплитудная модуляция (AM) – это изменение амплитуды A_H высокочастотных колебаний с частотой f_H синхронно с низкочастотными колебаниями (A_N; f_N) (рис. 1).

Амплитудная модуляция используется, например, при коротковолновой, средневолновой и длинноволновой передаче.

Частотная модуляция

Частотная модуляция (FM) – это изменение частоты f_H высокочастотных колебаний синхронно с низкочастотными колебаниями (рис. 2).

Частотная модуляция используется, например, в FM-радио и для звуковых каналов аналоговой телевизионной трансляции. Частотно-модулированный сигнал подвержен помехам, вызванным амплитудно-модулированными сигналами (например, вызванными системами искрового зажигания двигателей), в меньшей степени, чем амплитудно-модулированный сигнал.

Процессы цифровой модуляции

В случае цифровой модуляции, амплитуда или частота носителя изменяется дискретно. Таким образом, можно придать значение одного или более битов информации каждому из этих состояний несущей частоты, чтобы передавать цифровую информацию.

Проблемы с приемом сигнала

СВЧ-сигналы распространяются практически, по прямой. В результате этого радиоприемник в автомобиле может потерять сигнал от СВЧ-передатчика, находящегося на расстоянии всего 30 км, если между автомобилем и передатчиком находится возвышенность. С другой стороны, прием может быть идеальным и на большем расстоянии, если есть «линия прямой видимости» между автомобилем и передатчиком. Наличие «теневых радиозон» часто компенсируется установкой дополнительных передатчиков.

Сигнал может отражаться от склонов холмов или от высотных зданий. Отраженный сигнал принимается антенной приемника и накладывается на сигнал, полученный прямо от передатчика. В результате получается так называемый «многоканальный прием», вызывающий помехи и приводящий к ухудшению качества звука, принимаемого по радио.

Распространение электромагнитных волн ухудшается из-за проводников, расположенных в зоне излучения передатчика (например, стальных мачт или ЛЭП), и даже близлежащих лесов, зданий или глубоких долин. Характеристики распространения волн имеют значение для эффективного подавления помех теле- или радиоприемника, установленного в автомобиле. Идеальный

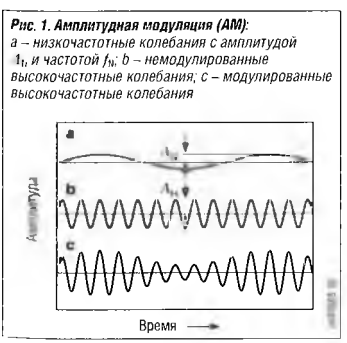


Рис. 1. Амплитудная модуляция (AM): *a – низкочастотные колебания с амплитудой A_H и частотой f_N; b – немодулированные высокочастотные колебания; c – модулированные высокочастотные колебания*

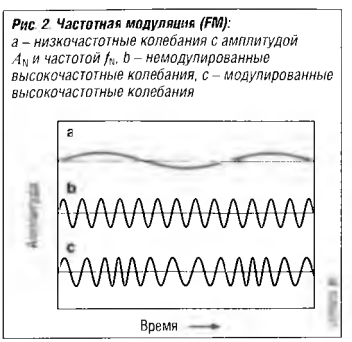


Рис. 2. Частотная модуляция (FM): *a – низкочастотные колебания с амплитудой A_N и частотой f_N, b – немодулированные высокочастотные колебания, c – модулированные высокочастотные колебания*

прием невозможен, если мощность сигнала от передатчика слишком мала. Например, прием сигнала, который до этого приходил без помех, прервется, если автомобиль заезжает в тоннель. Это можно объяснить экранированием сигнала железобетонными стенками туннеля, вследствие чего уменьшается полезная мощность сигнала передатчика, на который настроен приемник. Мощность паразитного сигнала при этом остается прежней. При некоторых условиях дальнейший прием сигнала радиостанции может оказаться невозможным. Сходные явления могут наблюдаться при передвижении в горной местности.

Радиопомехи

Радиопомехи являются следствием приема на антенну ненужных высокочастотных колебаний вместе с полезным сигналом. Радиопемихи могут быть вызваны включениями или перерывами подачи электрического тока. Это вызывает образование высокочастотных помех, например, от работы зажигания двигателя, включения или выключения переключателя или работы коммутатора электродвигателя. Такие быстрые переключения тока генерируют высокочастотные волны, которые вызывают помехи радиоприема в приемниках, расположенных поблизости. Среди прочих факторов эффект помех зависит от крутизны графика импульса сигнала помех и его амплитуды.

Радиопомехи, вызванные резко возрастающими по амплитуде импульсами, могут быть сведены к минимуму или полностью устранены применением мер EMC (электромагнитной совместимости).

Помехи могут достигать приемника различными путями: непосредственно по проводам, соединяющим источник помех и приемник, беспроводным путем через электромагнитное излучение или через емкостную или индуктивную связь. Строго говоря, последние три из перечисленных вариантов нельзя отделить друг от друга

Отношение сигнал-шум

Качество приема зависит от мощности электромагнитного поля, генерируемого передатчиком. Оно должно иметь существенно большую мощность, чем мощность поля помех, т.е. соотношение между мощностью сигнала передатчика и мощностью поля помех – соотношение сигнал-шум – должно быть, как можно большим.

Приемник, расположенный близко к источнику помех, получает не только полезный сигнал от соответствующего передатчика, но и нежелательный сигнал помех, если он передается на той же частоте. Тем не менее, качественный прием все-таки возможен, если мощность полезного сигнала от передатчика в точке приема достаточно велика по сравнению с мощностью электромагнитного поля, генерируемого источником помех. Мощность поля полезного сигнала от передатчика зависит от мощности передатчика, частоты передатчика, расстояния от передатчика до приемника и свойств распространения электромагнитных волн. Для средних и длинных волн мощность поля передатчика может ослабляться из-за топологических факторов до такой степени, что сигналы даже от мощных передатчиков могут иметь недостаточную силу в некоторых местах приема. При некоторых условиях СВЧ-сигналы могут существенно ослабляться. Приемники, установленные на транспортных средствах, могут иметь недостаточную мощность приема из-за короткой антенны. Соответственно, возможности улучшения отношения сигнал-шум на приемнике могут быть сильно ограничены.

Эффективность приема можно повысить регулировкой положения антенны, увеличив, таким образом, соотношение сигнал-шум, которое является решающим фактором для качества приема. Однако, зачастую, имеет место компромисс между техническими требованиями и конструкторскими соображениями. Еще один способ улучшения соотношения сигнал-шум – уменьшение мощности излучаемых помех.

Конструкция приемника также имеет значение для качества приема. Кроме металлического экранирования, предотвращающего прямой доступ помех, и фильтров на источнике питания, некоторые приемники оборудованы системами автоматического подавления помех (см. раздел «Улучшение приема»).

Радиоприемники

Радиоприемники, устанавливаемые на автомобилях, обычно называются «авторадио» или «автомобильные звуковые системы». Однако, это название относится не только к радиоприемникам, но и к различным устройствам, обеспечивающим применение в сфере информационного обеспечения и развлечений. Сюда входят анализ дополнительной информации (например, новости о ситуации на дорогах), проигрыватели медиа-файлов (например, компакт-диски и SD-карты), а также встроенные коммуникационные интерфейсы, сотовые телефоны и другие устройства.

За последние несколько лет в рамках традиционных аналоговых технологий передачи сигнала были разработаны некоторые новые системы. По этой причине современные автомобильные радиоприемники могут принимать сигналы от самых разных систем трансляции во всем мире. Кроме традиционных систем радиовещания, среди прочих, сюда входят системы DAB (цифровое аудиовещание), DRM (цифровая радиосистема «Mondiale») и SDARS (спутниковая цифровая аудиослужба).

Традиционный радиоприемник рассчитан на прием аналогового сигнала FM- и AM-модуляции, и канал передачи сигнала от антенны к аудиосистеме также является аналоговым. С другой стороны, современные автомобильные приемники с высокой мощностью приема обрабатывают сигнал в цифровой форме. Сигнал IF (промежуточной частоты) на выходе приемника переводится в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе, а затем подвергается обработке. При цифровой модуляции обычно меняется только демодуляция в цифровой части этой схемы.

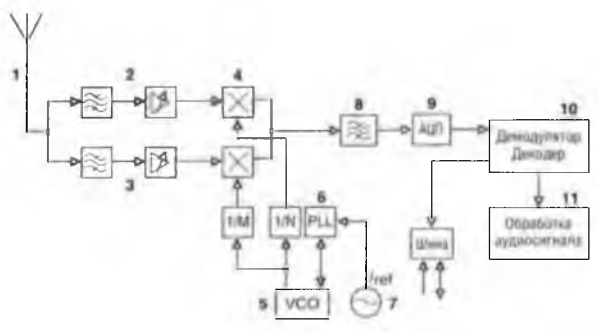
Традиционные приемники

Обработка сигналов

Антенна, обычно имеющая форму штыря или рамки, улавливает электромагнитный сигнал от передатчика. Сигнал передается по нескольким каналам по фиксированным, отделенным друг от друга частотам. Высокочастотные колебания переменного тока, генерируемые на выходе антенны, передаются на приемник и обрабатываются в нем.

Традиционный приемник для аналогового радиоприема обычно состоит из двух каналов прохождения сигнала: один для обработки амплитудно-модулированного сигнала и другой для обработки частотно-модулированного сигнала. Они обычно разделены на блоки, описанные ниже (рис. 3).

Рис. 3. Блок-схема радиоприемника:
1 – антенна; 2 – входной каскад FM-сигнала; 3 – входной каскад AM-сигнала; 4 – каскад преобразователя частоты, 5 – генератор, управляемый напряжением (VCO), 6 – система фазовой автоподстройки частоты (PLL); 7 – генератор опорной частоты, 8 – фильтр промежуточной частоты (IF), 9 – аналого-цифровой преобразователь, 10 – демодулятор и декодер, 11 – обработка аудиосигнала, f_{ref} – опорная частота



Система приема AM-сигнала
Полосовой фильтр выделяет полосу амплитудно-модулированного сигнала (полоса ДВ, СВ или КВ), и получающийся сигнал усиливается на следующей ступени с низким уровнем шума.

Ступень входа FM-сигнала
Частотно-модулированный СВЧ-сигнал принимается отдельным модулем. Входной фильтр настраивается либо на частоту приема, либо на всю полосу. Полученный сигнал затем регулируется по мощности до нужного уровня автоматическим усилителем для передачи к следующему модулю.

Генератор, управляемый напряжением
Генератор VCO (генератор, управляемый напряжением), частота которого регулируется системой фазовой автоподстройки частоты (PLL), генерирует высокочастотные колебания, которые делятся. При помощи этого сигнала входной сигнал преобразуется в постоянную промежуточную частоту (IF) в каскаде смесителя. Сигнал с кварцевой стабилизацией используется в качестве опорной частоты.

Каскад преобразователя частоты
Каскад преобразователя частоты преобразует входной сигнал в постоянную промежуточную частоту. Обычно для приема FM- и AM-сигналов используются разные каскады преобразователя частоты. Однако, принцип преобразования частоты у них один и тот же.

Фильтр и усилитель IF
Сигнал IF, получаемый таким образом, затем подается на фильтр IF и регулируемый усилитель.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)
Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал IF в цифровой сигнал.

Демодулятор
Демодулятор генерирует цифровой аудиосигнал из цифрового сигнала IF.

Декодер
Дополнительная информация, такая как данные от системы RDS (система передачи данных по радио), декодируется декодером и передается к процессору для обработки

Обработка аудиосигнала
После демодуляции аудиосигнал можно настроить, например, в соответствии с условиями в салоне автомобиля или предпочтениями слушателей. Это делается при помощи соответствующих регуляторов настройки тембра и громкости, а также настройки баланса между передними и задними и/или правыми и левыми динамиками.

Цифровые приемники
Цифровой приемник – это приемник со многими встроенными модулями, входной сигнал от которого может быть аналоговым или цифровым сигналом промежуточной частоты. Аналоговый сигнал преобразуется в цифровой, а цифровой сигнал обрабатывается в цифровом модуле. Такая технология позволяет обрабатывать сигнал способом, который неприменим для аналоговых технологий. В ней используются, например, фильтры сигнала IF, обеспечивающие очень хороший уровень нелинейных искажений, имеющие изменяемую полосу пропускания и регулируемые, в зависимости от условий приема сигнала. Кроме того, имеется ряд других средств обработки принимаемого сигнала, которые могут свести к минимуму помехи аудиосигнала (см. SHARX, DDA и DDS).

Цифровой эквалайзер
Цифровой эквалайзер (DEQ) состоит из многополосного параметрического эквалайзера, обеспечивающего возможность отдельной регулировки средних частот и усиление/ослабление сигнала на различных фильтрах Таким образом, можно свести к нулю нежелательный резонанс, который может возникнуть в салоне автомобиля, и оптимизировать качество звучания. Также можно выровнять звучание динамиков на различных частотах.

Некоторые эквалайзеры имеют готовые настройки фильтров. Эти настройки можно применить в соответствии с жанром музыки или типом транспортного средства (например, джаз или поп-музыка, фургон или седан).

Цифровая настройка звука
«Цифровая настройка звука» (DSA) – это система, которая автоматически анализирует и исправляет частотные характеристики автомобильных звуковых систем. Для приема и анализа звучания тестового сигнала громкоговорителей используется микрофон и цифровой обработчик сигнала (DSP). Затем

на эквалайзере выставляются оптимальные параметры звука для салона автомобиля.

Динамическое шумоподавление
Во время движения автомобиля функция «Динамическое шумоподавление» (DNS) использует микрофон для постоянного выявления и анализа спектра шумов от автомобиля, заглушающих аудиосигнал и ухудшающих восприятие звука. Данная функция использует выборочное усиление или динамическое подавление (уменьшение выходного сигнала между минимальной и максимальной величинами) частот звуковых помех для того, чтобы поддержать оптимальное качество звучания вне зависимости от шумов, производимых при движении.

Качество приема
Аналоговые радиопередачи обычно предназначены для приема наземными радиоприемниками. Условия приема не всегда идеальны, что приводит к ухудшению качества приема, в зависимости от положения приемника и передатчика и условий окружающей среды. В случае с приемом СВЧ-сигнала, большое значение имеет расположение приемника и передатчика в связи с факторами, описанными ниже.

Понижение уровня сигнала
Понижение уровня сигнала вызывается изменениями уровня принимаемого сигнала из-за препятствий на пути распространения сигнала, таких как туннели, высотные здания или горы.

Прием сигнала с нескольких направлений
Прием сигнала с нескольких направлений вызывается отражением сигнала от зданий, деревьев или водных поверхностей. Такое отражение может привести к существенному падению уровня приема и даже полной потере сигнала. Различия в силе принимаемого сигнала могут наблюдаться в точках, отстоящих всего на несколько сантиметров друг от друга. Такие флуктуации могут оказывать значительное влияние на качество приема, например, автомобильных приемников.

Помехи от смежных каналов
Помехи от смежных каналов могут возникать, если на смежном канале работает мощный передатчик.

Помехи от сигналов большой мощности
Помехи от сигналов большой мощности могут возникать, если поблизости находится передатчик большой мощности. Система защиты входного каскада приемника уменьшает мощность приема. Это приводит к ослаблению более слабого сигнала от передатчика, т.е. сигнал становится тише.

Перемодуляция
На некоторых передатчиках применяется повышение уровня модуляции, чтобы увеличить дальность приема или усилить громкость звука. Недостаток этого приема в том, что увеличиваются искажения и вероятность помех от эха.

Помехи от системы зажигания
Источники высокочастотных помех (такие, как система искрового зажигания, работа переключателей или коммутаторов электродвигателей) вызывают помехи приема.

Улучшение качества приема
В современных автомобильных приемниках применяется большое количество функций улучшения приема. Ниже приведен обзор наиболее важных из этих функций.

Система передачи данных по радио
Система передачи данных по радио (RDS) – это цифровая система передачи данных по радио FM-диапазона. Данный формат стандартизован в европейских странах. Он обеспечивает приемник дополнительной информацией относительно принимаемого аудиосигнала в отношении дополнительных частот, имеющих такую же модуляцию. Это позволяет приемнику переключаться на частоту, на которой помехи минимальны. В табл. 1 приведено описание такой информации.

Направленная цифровая антенна
Система «Направленная цифровая антенна» (DDA), разработанная фирмой Bosch, использует сигналы от двух антенн для расчета антенны с синтезированной апертурой с новыми характеристиками направленности. Это позволяет подавлять помехи, вызванные приемом сигнала с нескольких направлений, как показано на рис. 4.

Таблица 1. Коды международного стандарта радиоданных (MCPД)

Код	Транслируемая информация
PS	Название принимаемой станции
AF	Список дополнительных частот, на которых также вещает данная станция
PI	Идентификатор передающей станции
TP, TA	Идентификация станции, передающей информацию о дорожной обстановке, идентификация информации о дорожной обстановке
PTY	Идентификация типа станции
EON	Сигнализирует о передаче информации о дорожной обстановке
TMC	Стандартизованная информация о дорожной обстановке
CT	Время (для синхронизации бортовых часов)
RT	Передача текста (например, название музыкальной композиции)

Система цифровой диверсификации

Характеристики приема сигнала FM-радио в значительной мере зависят от места приема. Система цифровой диверсификации (DDS) использует несколько антенн, между которыми она может переключаться для того, чтобы улучшить прием. Система цифровой диверсификации, встроенная в цифровой приемник, использует один и тот же сигнал для формирования стратегии переключения, и этот сигнал после демодуляции выдается в виде аудиосигнала.



Рис 4. Оптимизация сигнала антенны:
1 – прямой сигнал, 2 – отражение, 3 – диаграмма направленности

Срез высоких частот

Помехи, вызываемые такими явлениями, как понижение уровня сигнала и прием с нескольких направлений, оказывают большее влияние на более высокие частоты аудиосигнала. Поэтому современные автомобильные приемники умеют обнаруживать такие помехи и уменьшать уровень аудиосигнала на высоких частотах, когда такие помехи имеют место.

Система SHARX

Система SHARX – это функция, которая автоматически регулирует полосу пропускания фильтра промежуточной частоты в зависимости от условий приема. Если различные станции вещают на близких частотах, эта функция значительно повышает качество разделения приема между ними, сужая полосу пропускания и обеспечивая прием без помех. Если близкие по частоте каналы отсутствуют, полосу пропускания можно расширить, уменьшив таким образом гармонические искажения.

Автоматическое подавление помех

Еще одно средство улучшения качества приема – это автоматическое подавление помех и от собственного автомобиля, и от других транспортных средств. Для этого демодулированный сигнал, содержащий импульсные помехи вместе с полезным сигналом, заглушается на период действия помех, и эта пауза заполняется полезным сигналом.

Литература

[1] Radio Regulations. International Telecommunication Union (ITU).

Транспортная служба видеоинформационной связи

Термин «транспортная служба видеоинформационной связи» обозначает системы, передающие информацию о движении транспорта для водителей и от водителей, и анализирующие эту информацию в автоматическом режиме.

Каналы передачи данных

В данный момент основные каналы передачи данных для телекоммуникации являются радиоканалами (аналоговыми и цифровыми). Передача данных по радио возможна только в одном направлении – от системы к водителю. Ответы на индивидуальные запросы могут, тем не менее, отправляться, например, через систему GSM (глобальная система мобильной связи). Таким образом, обмен информацией между водителем и провайдером услуги может осуществляться в обе стороны.

Количество обмениваемой информации ограничивается шириной полосы пропускания доступных каналов передачи данных. Поэтому необходима система кодирования с низкой избыточностью. Однако, имеющаяся полоса пропускания была существенно увеличена, сначала при посредстве системы GPRS (система пакетной радиосвязи общего пользования), а затем при посредстве системы UMTS (универсальная система мобильной связи) в качестве каналов передачи данных. В будущем возможно расширение каналов передачи после введения в действие «придорожных станций» в соответствии со стандартом 802.11p (WLAN: беспроводная локальная сеть).

Стандартизация

Стандартизация содержания сообщений является важной предпосылкой внедрения функции оценки информации от различных источников средствами различных бортовых терминалов.

Распространенный стандарт RDS/TMC (система передачи радиоданных/канал передачи сообщений о дорожной обстановке) для радио FM-диапазона охватывает сообщения о типе помехи движению (например, «пробка», перекрытие движения), причинах (например, авария, обледенение дороги), ожидаемой продолжительности, а также обозначение участка дороги, к которому относится сообщение. Цифровые коды для пересечений дорог, отрезков шоссе и географических регионов уже введены в действие во многих странах. Однако, эти условия ограничены, в основном, только наиболее важными дорогами (шоссе и автострады).

Теперь также стало возможно, при использовании стандарта TPEG (группа экспертов по транспортному протоколу), передавать прогнозы дорожной обстановки и рекомендации относительно альтернативных маршрутов. Ограничение пронумерованными заранее заданными пересечениями дорог и отрезками трасс в пределах дорожной сети, имеющее место в системе TMC, больше не действует при использовании стандарта AGORA-C. Этот стандарт позволяет кодировать сообщения относительно любой дороги без применения передатчика и приемника, использующих идентичные версии кодировочных таблиц. Однако, в связи с требуемой полосой пропускания, передача возможна только по цифровым каналам.

Динамическая маршрутизация

Стандартизация кодировки сообщений о дорожной обстановке позволяет компьютеру определять, существуют ли альтернативные маршруты на случай возникновения помех дорожному движению. Из общего количества сообщений отфильтровываются важные сообщения, в соответствии с местоположением транспортного средства и, если необходимо, с его движением по маршруту. При указании направления по альтернативному маршруту, водитель информируется о том, что маршрут был выбран в соответствии с полученной информацией о дорожной обстановке. Дальнейшие рекомендации по прохождению маршрута последуют в соответствии с новым маршрутом (см. «Навигация»).

Запись информации

Преимущества транспортной службы видеоинформационной связи зависят от качества сообщений и от того, насколько устарела информация. Информация о потоке транспорта на участках дороги снимается посредством катушек индуктивности, установленных в дорожном покрытии, датчиков на автострадных мостах и в соответствии с принципом передачи «данных от транспортного средства в потоке». В соответствии с этим принципом, транспортное средство движется в потоке и передает данные о своем положении и скорости в центр управления через регулярные промежутки времени. На основе статистического анализа этих данных формируются сообщения о текущей дорожной ситуации.

Регистрирующая аппаратура ЕС

Законодательные нормы

В странах ЕС предписано устанавливать регистрирующую аппаратуру ЕС (регистраторы движения) на коммерческие транспортные средства и легкие грузовики с разрешенной полной массой свыше 3,5 т и на автобусы с количеством мест более восьми. В некоторых других странах также существуют аналогичные нормативные акты, предписывающие установку подобных устройств.

Регистрирующая аппаратура ЕС предназначена для отслеживания периодов движения, работы и парковки транспортных средств в соответствии с нормативным актом ЕС 561/2006. Этот нормативный акт также регулирует процедуры обращения с регистрирующей аппаратурой и записанными данными.

Аналоговые системы вытеснены цифровыми системами. Начиная с мая 2006 года, на новые транспортные средства устанавливаются только цифровые тахографы. Обновлять аппаратуру на других транспортных средствах не обязательно.

Конструктивные особенности

Аналоговые тахографы ЕС

Применение метода

Тахографы ЕС (Европейское содружество) являются регистраторами, предназначенными для отслеживания периодов движения, работы, простоя и парковки транспортных средств (запись времени и группы) вместо записи только времени движения и остановки. В зависимости от версии устройства, такая запись возможна для одного или двух водителей. Длительности периодов записываются на диаграммных дисках тахографа (рис. 1). Эти диаграммные диски представляют собой ежедневные записи работы водителя.

В более старых версиях тахографов ЕС, сигнал о скорости записывается механическим способом. В версиях с электронной измерительной системой, сигнал о скорости приходит от импульсного датчика, преобразующего обороты ходовой шестерни спидометра в электрические импульсы. Более современные тахографы ЕС включают в себя блок записи (данных на диаграммный диск) и отдельный дисплей для показа скорости и километража (пройденных км) (MTCO – модульный тахограф)

Оценка

Визуальный обзор диаграммного диска тахографа позволяет одним взглядом оценить все важные данные. Это позволяет провести простую проверку действий в течение дня.

Подробная процедура оценки проводится при помощи специального микроскопа; при этом доступны подробные данные вплоть до одного метра и секунды. Эта процедура позволяет очень точно оценить ход движения, например, перед аварией.

При управлении работой парка транспортных средств диаграммные диски тахографов можно подвергнуть полуавтоматической или полностью автоматической проверке, и данные будут обрабатываться в электронном виде.

Периодические проверки

Регистраторы движения и тахографы ЕС являются объектом строгого регулирования по допускам, указанным в Нормативном акте ЕЕС 3821/85. Эти нормы и правила также распространяются на проведение периодических проверок тахографа и комплектующего оборудования уполномоченными представителями.

Цифровые тахографы ЕС

Цифровой тахограф (DTCO) разработан в соответствии со спецификациями, приведенными в Приложении 1В нормативного акта с поправками от августа 2002 года для регистрирующей аппаратуры на транспортных средствах (ЕЕС 3821/85). Комиссия ЕС установила очень высокие требования в отношении безопасного хранения данных. Прибор DTCO отвечает критериям ITSEC (критерии оценки безопасности информационных технологий) в соответствии со стандартом «E3 high».



Рис. 1. Диаграммный диск аналогового тахографа: 1 – шкала времени, 2 – запись скорости; 3 – периоды движения и остановок (запись во временных группах); 4 – пройденное расстояние

Тип

DTCO (например, DTCO 1381 от VDO) обозначает размер радиоприемника автомобиля. Он подключается через слот DIN (рис. 2). В устройстве имеются два считывающих устройства данных водителя и помощника водителя. На дисплее показан каждый эксплуатационный режим; кнопочная панель позволяет водителю ввести тип своей деятельности. Встроенный тепловой принтер позволяет немедленно распечатать данные из памяти устройства.

Запись данных

Устройство DTCO соответствует всем требованиям Европейского содружества в сфере записи длительностей периодов движения и остановки. Кроме предписанных спецификаций, устройство обладает дополнительными возможностями, предоставляющими преимущества для водителя и владельца транспортного средства (например, запись данных для оценки обстоятельств аварии). Устройство DTCO записывает следующие данные:

- периоды движения, работы и парковки транспортного средства для водителя и помощника водителя;
- скорость движения и пройденное расстояние;
- специфические параметры, такие, как обороты коленчатого вала двигателя, различные действия, совершенные при помощи транспортного средства, и информация о калибровке или периодических осмотрах.

Хранение данных

Данные хранятся таким образом, что фальсификация исключена:

- данные по транспортному средству – во встроенном устройстве хранения данных (электронной памяти) с возможностью записи действий в течение, приблизительно, одного года;
- данные по водителю – на личной карте с возможностью записи действий в течение, приблизительно, одного месяца. Перед каждой поездкой водитель должен вставить эту карту в устройство DTCO.

Санкционирование доступа

Санкционирование доступа осуществляется путем вставления карты тахографа:

- управляющие парком автомобилей могут использовать карту компании, чтобы защитить свои данные от несанкционированного доступа;
- инспекторы используют инспекционную карту, чтобы доказать свои полномочия;
- уполномоченные специалисты-ремонтники могут задействовать функцию калибровки прибора DTCO при помощи своей карты ремонтника.

Интерфейсы

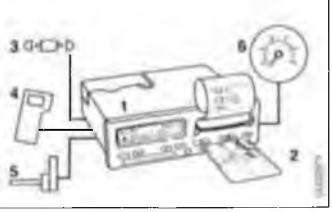
Записанные данные считываются для анализа и архивирования. Прибор DTCO имеет различные интерфейсы:

- для считывания данных, записанных в блоке памяти, при помощи специального ключа считывания;
- для подключения устройства к электронике транспортного средства (например, схеме определения движения для управления дверями автобуса);
- для считывания сигналов о состоянии прибора;
- для подключения к комбинации приборов;
- для проведения инспекций (периодических осмотров) и программирования (например, введения регистрационного номера транспортного средства, номера кузова);
- для подключения бортового компьютера или телеинформационных систем;
- для подключения устройств для удаленной передачи записанных данных.

Оценка данных

Записанные данные могут быть получены менеджером парка автомобилей, который может использовать данные для управления действиями водителей и для расчета заработной платы. Можно также улучшить планирование и использование грузоподъемности транспортного средства.

Рис. 2. Цифровой тахограф:
1 – тахограф с принтером; 2 – карта тахографа, 3 – ключ для считывания данных; 4 – миникомпьютер для тестирования, 5 – датчик скорости, 6 – спидометр



Системы повышения безопасности дорожного движения

Ситуации, связанные с безопасностью дорожного движения

Системы повышения безопасности нацелены на то, чтобы помочь водителю оценить дорожную ситуацию, выявить источники опасности и совершить соответствующие маневры. Задача состоит в том, чтобы, предпочтительно, полностью исключить дорожные происшествия или, как минимум, свести их последствия к минимуму.

При возникновении ситуации, опасной с точки зрения безопасности дорожного движения, зачастую всего за доли секунды решается, произойдет ли авария. Согласно исследованию [1], приблизительно 60 % столкновений с задней частью автомобиля и приблизительно 30 % столкновений с передней частью автомобиля можно было бы избежать, если бы водитель отреагировал на опасность на пол-секунды раньше. Каждой второй аварии на пересечениях дорог можно было бы избежать при условии более быстрой реакции водителя.

В конце 1980-х годов, когда была представлена концепция высокоэффективной и частично автоматизированной системы управления дорожным движением в рамках проекта ЕС «Прометей», электронных компонентов системы еще не было. Благодаря вновь созданным высокочувствительным датчикам и мощным микрокомпьютераммы еще на один шаг приблизились к созданию «интеллектуального» автомобиля. Датчики принимают информацию об окружающей обстановке, а системы повышения безопасности вырабатывают предупреждения на основе данных о выявленных объектах или непосредственно совершают требуемые маневры. Все это происходит в течение тех решающих долей секунды, которых недостаточно для реакции даже самого внимательного и опытного водителя.

Рис. 1. Причины аварий на дорогах Германии вне зон застройки [2]



Причины аварий и возможные контрмеры

Анализ причин аварий на дорогах Германии вне зон застройки [2] показывает, что более трети общего количества аварий произошло потому, что водитель менял полосу движения или не смог остаться на прежней полосе движения (рис. 1). Системы повышения безопасности, способные обозревать «слепую зону» и подавать предупреждения об опасностях, связанных с изменением полосы движения, являются средством уменьшения количества аварий, вызванных указанными причинами.

Приблизительно еще треть аварий составляют столкновения с задней и передней частью автомобиля. Системы предупреждения столкновений могут представлять собой первый уровень защиты против таких столкновений. Вторым уровнем защиты могут быть системы ухода от столкновений, которые активно вмешиваются в управление динамикой автомобиля. Первый шаг в этом направлении уже сделан с разработкой адаптивного круиз-контроля (ACC).

Аварии, в которых участвуют пешеходы, и аварии на пересечениях дорог отличаются высоким уровнем сложности. Анализ таких сложных дорожных ситуаций по плечу только сетевым системам с возможностями интерпретации сценариев. Исследователи сейчас заняты разработкой таких систем.

Применение

Многофункциональные системы повышения безопасности делятся на следующие две категории:

- системы безопасности, нацеленные на предотвращение аварий;
- системы создания комфортных условий для водителя, имеющие в качестве перспективной цели обеспечение частичной автоматизации управления автомобилем.

Можно также выделить следующие различия между системами:
- активные системы, вмешивающиеся в управление динамикой автомобиля;
- пассивные системы, т.е. такие, которые предоставляют информацию, но не вмешиваются в управление динамикой автомобиля.

Функции удобства и функции безопасности

На рис. 2 показаны различные системы повышения безопасности. Системы пассивной безопасности (рис. 2, нижний левый угол) обеспечивают функции для уменьшения последствий аварии, такие, как подготовка к столкновению и меры защиты пешехода.

Системы помощи водителю, не вмешивающиеся в управление автомобилем (нижний правый угол) создают предпосылки для облегчения работы водителя. Такие системы подают водителю предупреждения или рекомендации относительно маневра. Средства облегчения парковки включают разнообразные функции, от простой подачи сигнала о расстоянии до помехи до частично автоматизированного движения автомобиля на свободное место для парковки, при котором водителю требуется только управлять автомобилем по продольной оси (помощник руления при парковке).

Выявление потенциально опасных объектов в «слепой зоне» осуществляется датчиками ближнего действия (например, ультразвуковыми или радарными датчиками). Видеодатчики могут быть успешно использованы для улучшения обзора для водителя в ночное время. Система предупреждения о смене полосы движения использует видеокамеру для мысленного продолжения полосы движения перед автомобилем и предупреждения водителя об уходе с полосы движения при том, что сигнал об изменении движения не был подан. Предупреждение может быть подано в виде звукового сигнала через динамики, или механически в форме изменения усилия на рулевом колесе.

Адаптивный круиз-контроль (ACC) – одна из систем управления автомобилем (верхний правый угол иллюстрации). Более продвинутая версия этой системы снимает с водителя часть задач по управлению в сложной обстановке движения в медленном потоке и большим количеством автомобилей в потоке – сперва, задействуя тормоза до полной остановки, а затем ведя автомобиль вперед на малой скорости (ACC, функция Stop & Go). В качестве дальнейшего развития этой системы предполагается организовать взаимодействие между различными датчиками, чтобы обеспечить возможность линейного контроля автомобиля даже для езды по городу и на больших скоростях. Это будет сделано на основе интеграции данных от радаров и видеосистем.

Путем интеграции систем линейного контроля с системами бокового обзора (систе-

Рис. 2. Системы повышения безопасности, имеющие функции безопасности и обеспечения управления и основанные на датчиках кругового обзора



мами отслеживания положения на полосе тоже основанными на видеотехнологиях) теоретически возможно создать автономную систему управления. Системы отслеживания положения на полосе – это дальнейшее развитие систем предупреждения о смене полосы движения.

Активные системы безопасности дорожного движения (верхний левый угол иллюстрации) охватывают все функции, имеющие целью предотвратить аварии. Повышенные требования, предъявляемые к таким системам в отношении функциональности и надежности, распространяются от простой функции остановки автомобиля до того, как он столкнется с препятствием во время парковки, до функции компьютеризированного управления маневром для ухода от столкновений. Функции средней сложности обеспечиваются выдачей предупреждений и прогнозов от систем безопасности дорожного движения. В этот ряд включены такие функции, как предупредительное задействование тормозов при обнаружении опасности, посредством кратких циклов торможения (кинестетическое предупреждение водителю), вплоть до экстренного торможения.

Электронные датчики кругового обзора

Применение электронных систем кругового обзора позволяет обеспечить ряд функций облегчения труда водителя – как предупредительных, так и активного вмешательства в управление. На рис. 3 показана дальность обнаружения для различных датчиков систем кругового обзора, используемых в настоящее время.

Очень малая дальность

Система помощи при парковке ParkPilot действует на очень малой дальности посредством ультразвука. Используемые в настоящее время датчики имеют дальность приблизительно 2,5 м. Версии датчиков с дальностью свыше 4 м также используются в более продвинутых системах помощи при парковке и для перемещения автомобиля на свободное место для парковки.

Во время маневров для парковки система ParkPilot, основанная на ультразвуке, может использоваться в сочетании с видеодатчиками, установленными в задней части автомобиля.

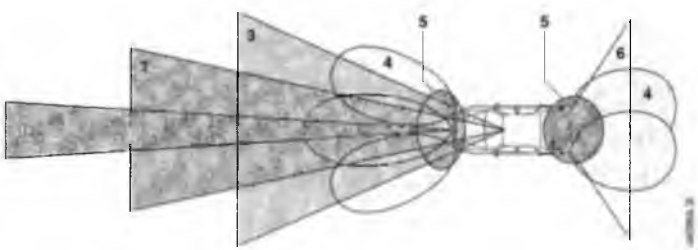
Большая дальность

Большая дальность обеспечивается применением радаров большой дальности (LRR) в системах повышения безопасности движения. В данное время используются датчики с рабочей частотой 76,5 ГГц и дальностью примерно 200 м.

Малая дальность

Ультразвуковые датчики с увеличенной дальностью могут использоваться в качестве «виртуального щита безопасности» вокруг автомобиля, с определенными ограничениями (до 20 м). Этот щит может выполнять ряд функций. Во-первых, сигналы от помех, находящихся в пределах этой дальности, предупреждают водителя о потенциально опасных ситуациях; во-вторых, эта система служит источником данных для систем безопасности и создания комфорта и удобства работы для водителя. Эти датчики могут также обеспечивать обзор

Рис. 3. Дальности действия датчиков систем кругового обзора:
1 – большая дальность (< 200 м), *радар дальнего действия с частотой 77 ГГц; 2 – дальность датчиков ночного обзора* (< 150 м), *инфракрасная система ночного обзора, 3 – средняя дальность* (< 80 м), *внешний обзор в видеодиапазоне; 4 – малая дальность* (< 20 м), *ультразвуковые датчики или радар с частотой 24 ГГц; 5 – сверхмалая дальность* (< 4,5 м), *ультразвуковые датчики; 6 – сверхмалая дальность, видеокамера заднего обзора*



даже в «слепых зонах». Для обеспечения большей дальности могут использоваться датчики радаров ближнего действия (SRR) с рабочей частотой 24 ГГц.

Средняя дальность

Начиная с 2005 года, в Германии серийно выпускаются автомобили, оборудованные системами улучшения обзора в ночное время. В будущем такие системы будут играть ключевую роль среди систем повышения безопасности, поскольку они не только выполняют ряд функций для облегчения управления автомобилем, но и специально предназначены для анализа визуальной информации (классификация объектов).

При выполнении функции улучшения видимости в ночное время, пространство перед автомобилем подсвечивается инфракрасным лучом. На дисплее показано изображение от камеры, которая работает также в инфракрасном диапазоне. Поле зрения для водителя увеличивается до 150 м и более, причем инфракрасный луч не слепит других водителей и может быстрее идентифицировать помехи и опасности в темноте.

Дневная и ночная камера фронтального обзора помогает обеспечивать ряд функций, например, определение полосы движения и дорожных знаков. Система определения полосы движения помогает определять границы и направление полосы движения. Если есть опасность ухода автомобиля с полосы, система подает предупреждение водителю. При дальнейшем развитии этой системы можно обеспечить функцию автоматизированной помощи водителю для удержания автомобиля на полосе движения, когда система возвращает автомобиль на полосу, повернув рулевое колесо. В сочетании с системой круиз-контроля может быть сформирована идеальная система облегчения управления автомобилем в условиях плотного медленного потока.

Еще одна функция, для которой пригодятся данные от видеосенсоров – распознавание дорожных знаков. Эта система может распознавать и анализировать дорожные знаки (например, ограничение скорости или запрет обгона). Затем на комбинации приборов отображается последний из распознанных дорожных знаков. При превышении скорости подается предупреждение водителю.

Камера фронтального обзора также помогает датчикам системы круиз-контроля, не только измеряя расстояния до объектов, но и помогая затем в их идентификации. Сочетание видеосистемы с радаром дальнего действия дает синергетический эффект – и дальность обнаружения, и надежность идентификации объектов существенно улучшаются для системы круиз-контроля.

Камера заднего обзора обеспечивает важные преимущества, если программы обработки изображения идентифицируют обнаруженные объекты и подают сигналы водителю в случае необходимости. Такая необходимость может возникнуть, например, если смена полосы движения может быть опасной, т.к. быстро приближается другой автомобиль по соседней полосе.

В настоящее время в системах повышения безопасности, обеспечивающих информирование водителя, используются видеотехнологии. Современные видеодатчики пока еще далеки от возможностей человеческого глаза в отношении разрешающей способности, чувствительности и световосприятия. Однако, развитие методов обработки изображений расширяет возможности этих датчиков.

Синтез информации от датчиков

Для того чтобы обеспечить гибкость функций помощи водителю и одновременно получить возможность идентификации нескольких объектов одновременно, в будущем предполагается совместно обрабатывать сигналы от многих датчиков. Эта процедура именуется «синтезом информации от датчиков». Она позволяет системам повышения безопасности формировать цельную реалистичную картину дорожной обстановки. Таким образом, информация о дорожной обстановке оказывается более надежной, чем, если бы она формировалась на основе данных от отдельных датчиков.

В будущем системы повышения безопасности будут постепенно включать в себя функции все новых и новых датчиков и устройств, и будут получать новые связи с другими системами автомобиля.

Список литературы

[1] K. Enke. Possibilities for Improving Safety within the Driver Vehicle Environment Loop; 7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle, Paris (1979).

[2] Unfallstatistiken Deutschland 2008, Statistisches Bundesamt.

Системы парковки автомобилей

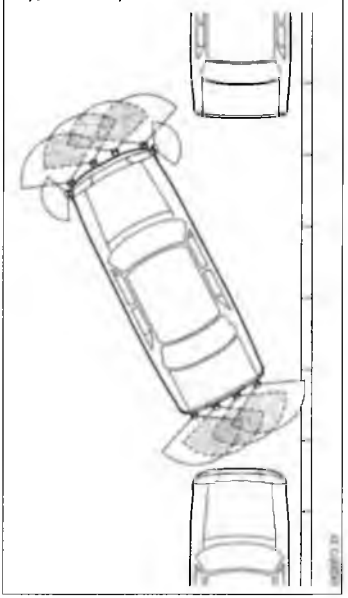
Вспомогательное средство парковки с ультразвуковыми датчиками

Применение

Во многих современных конструкциях автомобилей, имеющих клинообразную форму и, как следствие, низкий коэффициент аэродинамического сопротивления, значительно ограничена обзорность сзади, из-за чего затруднено или даже невозможно распознавание препятствий позади автомобиля. Эффективную помощь водителю при установке автомобиля на стоянку оказывают вспомогательные средства в виде ультразвуковых датчиков. С их помощью контролируется зона приблизительно от 20 до 250 см позади или, при необходимости, впереди автомобиля. Система обнаруживает препятствия, и расстояние от них до автомобиля обозначается визуальными или звуковыми сигналами.

Многие производители автомобилей предлагают вспомогательные средства для парковки в качестве дополнительной опции; в некоторых автомобилях такие средства устанавливаются в стандартной комплектации. Для оборудования уже сошедших с конвейера автомобилей предлагаются системы, адаптируемые для различных моделей автомобилей. Эти системы должны иметь возможность работать на как можно более разнообразных моделях. Угол установки и расстояние между датчиками определяются для каждой конкретной модели автомобиля. Эти параметры принимаются во внимание в алгоритмах обработки данных.

Рис. 1. Сканирование парковочной системы с круговым обзором

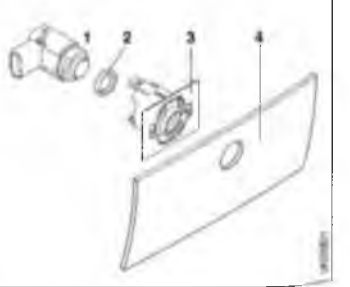


Система

Средства помощи при парковке состоят из следующих основных компонентов: ЭБУ, элемент предупреждения водителя и ультразвуковые датчики. Различаются числом датчиков и их излучательной способностью.

Как правило, если система предупреждения установлена только в задней части автомобиля, она имеет четыре ультразвуковых датчика в заднем бампере; некоторые автомобили большого размера, например, внедорожники, оборудуются шестью датчиками. Система предупреждения в передней части автомобиля оборудуется четырьмя или шестью дополнительными ультразвуковыми датчиками в переднем бампере (рис. 1). Датчики надежно крепятся на бампере в определенных положениях с помощью специальных кронштейнов (рис. 2).

Рис. 2. Принципы установки ультразвукового датчика в бампере:
1 – датчик, 2 – изолирующая прокладка; 3 – корпус датчика; 4 – бампер



Эта система приводится в действие автоматически при включении задней передачи. Система предупреждения в передней части автомобиля автоматически приводится в действие, если скорость автомобиля падает ниже порога приблизительно в 15 км/ч. Во время работы функция самопроверки обеспечивает постоянное слежение за исправностью работы всех компонентов.

Ультразвуковой датчик

Сам датчик состоит, в основном, из пластмассового корпуса с гнездами для подключения и алюминиевой мембраны, к внутренней стороне которой подсоединен пьезокерамический резонатор в форме тонкого диска (см. раздел «Ультразвуковой датчик» в главе «Датчики»). Этот резонатор может работать, как передатчик (динамик) или как приемник (микрофон). Электронные схемы для включения датчика и обработки сигнала расположены на печатной плате внутри корпуса.

Они электрически соединены с ЭБУ с помощью трех выводов, два из которых – питающие. Третий, служащий в качестве двунаправленной сигнальной линии, используется для активизации функции передачи сигналов и принятия возвращенного сигнала в ЭБУ. Когда датчик получает от блока управления цифровой импульс на передачу сигнала, электронная цепь подает на алюминиевую мембрану импульсы возбуждения с квадратной формой волны на резонансной частоте, вызывая вибрацию мембраны, которая испускает ультразвуковые волны с частотой приблизительно 48 кГц (рис. 3). Диафрагма, которая со временем приходит в состояние покоя, снова начинает вибрировать под действием звуковых волн, отраженных от препятствия. Эти вибрации преобразуются пьезоэлектрической пластиной в аналоговый электрический сигнал, который затем усиливается и преобразуется в цифровой.

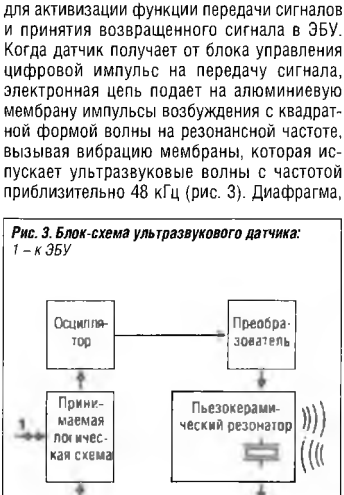


Рис. 3. Блок-схема ультразвукового датчика:
1 – к ЭБУ

Измерение дальности

При определении дальности при помощи ультразвука (рис. 4) датчики излучают ультразвуковые импульсы и измеряют время, за которое импульсы, отраженные от объектов, возвращаются обратно. Расстояние l между датчиком и ближайшим объектом вычисляется из соотношения времени t_e возврата первого отраженного импульса и скорости звука c по следующей формуле:

$$l = 0{,}5\, t_e\, c,$$

где

t_e – время возврата ультразвукового сигнала;

c – скорость звука в воздухе ($c \approx 340$ м/с).

Геометрическое расстояние a между препятствием и передней частью автомобиля определяется методом триангуляции на основе полученных данных (расстояний b и c) от двух ультразвуковых датчиков, установленных на расстоянии d друг от друга (рис. 5).

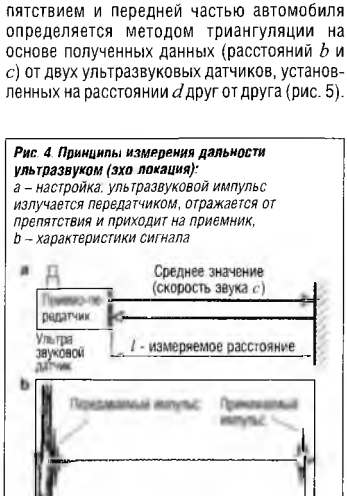


Рис. 4. Принципы измерения дальности ультразвуком (эхо локация):
a – настройка: ультразвуковой импульс излучается передатчиком, отражается от препятствия и приходит на приемник, b – характеристики сигнала

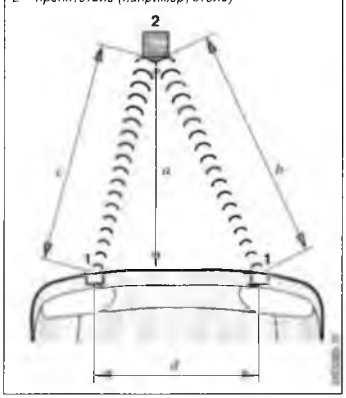
Растояние a рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \sqrt{c^2 - \frac{(d^2 + c^2 - b^2)^2}{4d^2}}.$$

Чтобы система могла исследовать как можно более широкую зону, ее детекторные характеристики должны отвечать определенным требованиям. Горизонтальная часть характеристики должна иметь более широкий угол охвата; с другой стороны, по вертикали требуется достичь компромиссной характеристики. Чтобы избежать помех из-за отражений от поверхности дороги, угол обзора не должен быть слишком широким; однако, существующие препятствия должны обнаруживаться надежно. На рис. 6 показаны характеристики излучения по горизонтали и вертикали.

Современные датчики позволяют изменять угол обнаружения препятствия в определенных пределах, что позволяет добиться оптимальной настройки в соответствии с геометрией бампера и корпуса автомобиля. Компактная конструкция этих датчиков является благоприятным фактором, в особенности, учитывая требования к улучшенной безопасности пешеходов в конструкции бамперов.

Рис. 5. Определение расстояния до препятствия при помощи ультразвука:
a – расстояние от бампера до препятствия;
b – расстояние от датчика 1 до препятствия;
c – расстояние от датчика 2 до препятствия;
d – расстояние от датчика 1 до датчика 2;
1 – ультразвуковые датчики;
2 – препятствие (например, столб)



Электронный блок управления (ЭБУ)

ЭБУ содержит стабилизатор напряжения для датчиков, интегрированный микропроцессор и все промежуточные схемы, необходимые для адаптирования различных входных и выходных сигналов. Программное обеспечение предполагает выполнение следующих функций:

- активация датчиков и прием отраженных сигналов;
- измерение времени получения отраженного сигнала и расчет расстояния до препятствия;
- активация системы предупреждения;
- оценка входных сигналов от систем автомобиля (например, сигнал о включении задней передачи);
- контролирование работы компонентов системы, включая накопление отказов;
- обеспечение функций диагностики.

Предупреждающие элементы

Предупреждающие элементы, сигнализирующие о критическом расстоянии до препятствия, обычно включают сочетание звукового и оптического сигналов. В настоящее время используются как светодиодные (LED), так и жидкокристаллические (LCD) оптические сигналы.

Если в комбинации приборов или на центральной консоли установлен монитор, собственный автомобиль на нем может быть показан вместе с препятствием, например, в проекции сверху. Это обычно улучшает восприятие ситуации водителем.

Рис. 6. Схема излучения антенны ультразвукового датчика:
1 – по горизонтали, 2 – по вертикали



Помощник при парковке

Помощник при парковке основан на ультразвуковых датчиках и построен на принципе последовательных операций. На каждой стадии выполняется самостоятельная операция. Систему можно расширить, установив дополнительные датчики по бортам автомобиля.

Измерение свободного пространства для парковки

После включения системы ультразвуковой датчик, установленный сбоку автомобиля, измеряет длину и глубину свободного места для парковки, когда автомобиль проезжает мимо него (рис. 7). Длина измеряется путем оценки сигналов от счетчика оборотов колеса. Затем помощник при парковке сообщает водителю, достаточна ли длина свободного места для парковки. Если в пределах свободного места имеются препятствия, водитель получает соответствующий сигнал. Однако, выполнение этой функции возможно только, если дальность действия датчиков составляет не менее, чем приблизительно 4,5 м.

Устройство помощи при парковке, обеспечивающее водителя информацией

После измерения длины свободного места для парковки геометрия окружающей обстановки может быть использована для выбора оптимальной траектории для парковки. При парковке система может давать водителю рекомендации относительно того, как правильней поворачивать рулевое колесо, чтобы, как можно лучше завести автомобиль в место парковки. Во время парковки траектория постоянно пересчитывается и отображается на дисплее. Для этого устройство помощи при парковке должно постоянно получать сигналы от датчика угла поворота рулевого колеса (ESP).

Устройство помощи при парковке с функцией рулевого управления

Следующая ступень развития систем парковки – система с функцией электрического рулевого управления. Чтобы создать такую систему, она должна иметь функцию электропривода рулевого управления

После измерения свободного пространства для парковки и включения задней передачи, водитель убирает руки с рулевого колеса и действует только при помощи педалей акселератора и тормоза. Устройство помощи при парковке принимает на себя управление рулем самостоятельно. Такая функция уже предлагается в некоторых стандартных автомобилях среднего размера в верхнем сегменте рынка.

Дальнейшие возможности развития

Ультразвуковые датчики с увеличенной дальностью (приблизительно до 4,5 м) позволяют обнаруживать объекты в «слепых зонах» автомобиля. Это означает, что датчики имеют много функций. Выявляются опасные ситуации, вызванные присутствием других автомобилей и их движением, и водитель получает предупредительные сообщения. Система не подает предупреждений относительно автомобилей, припаркованных на обочине, или приближающихся по дороге.

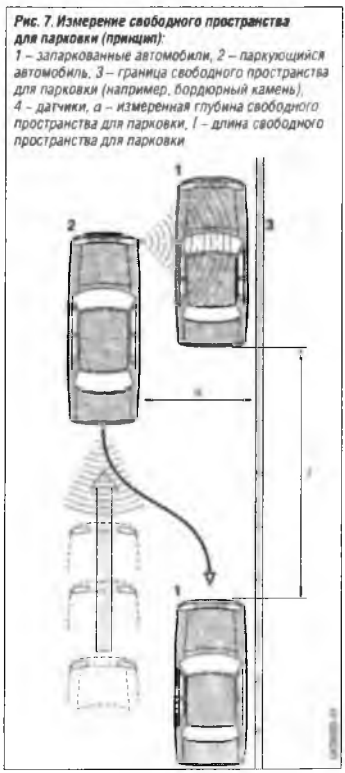


Рис. 7. Измерение свободного пространства для парковки (принцип):
1 – запаркованные автомобили, 2 – паркующийся автомобиль, 3 – граница свободного пространства для парковки (например, бордюрный камень), 4 – датчики, a – измеренная глубина свободного пространства для парковки, l – длина свободного пространства для парковки

Автомобильная навигация

Навигационные системы

Определение места автомобиля, главным образом, опирается на систему GPS (система глобального позиционирования). Навигационная система сравнивает вычисленную позицию с цифровой картой и использует эту карту для расчета маршрута к нужной точке.

Навигационное оборудование может устанавливаться на транспортное средство на заводе-изготовителе (рис. 1). Также широко используются мобильные навигационные системы. По сравнению с портативными системами постоянно установленные устройства обеспечивают лучшее качество позиционирования, и, значит, улучшенную навигацию, поскольку можно получать данные от дополнительных датчиков расстояния и направления (скорость и направление), и антенну можно установить в более благоприятном месте для приема спутникового сигнала. В качестве опции для стационарного оборудования широко используются сетевые возможности, т.е. возможна сетевая интеграция системы. Голосовые сообщения могут озвучиваться через динамики и заглушаться при разговоре по телефону. Информация по выбору маршрута может отображаться в комбинации приборов или на мониторе, или отражаться на ветровом стекле, и быть доступной в рамках основного поля зрения водителя.

Функции навигации

Позиционирование

Система глобального позиционирования (GPS)

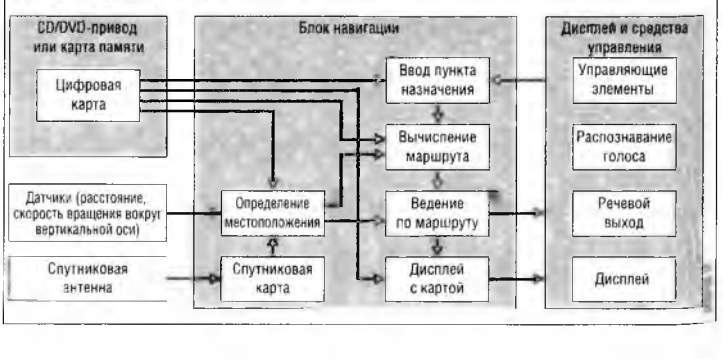
Система GPS основана на сети из 24 военных спутников США, которые используются для глобального позиционирования (рис. 2). Они летают вокруг Земли по шести различным орбитам на высоте приблизительно 20 000 км с интервалом в 12 часов. Они расположены таким образом, что с каждой точки на поверхности Земли видны, как минимум, четыре (обычно до восьми) спутников выше линии горизонта.

Эти спутники 50 раз в секунду передают специальные сигналы положения, идентификации и времени на несущей частоте 1,57542 ГГц. Каждый спутник имеет на борту двое цезиевых и двое рубидиевых атомных часов с отклонением менее 20–30 нс для высокоточного определения времени для сигналов.

Определение положения

Сигналы от спутников приходят на GPS-приемник автомобиля не одновременно из-за различия расстояний. Положение приемника рассчитывается методом радиогеодезических измерений. При получении сигналов, как минимум, от трех спутников, навигационное устройство рассчитывает свое географическое положение в двух измерениях (долгота и широта). Имеется только одна точка, соответствующая условиям дальности (времени прибытия сигналов). При получении сигна-

Рис. 1. Навигационная система



лов, как минимум, от четырех спутников, может быть рассчитано положение приемника в трех измерениях (с учетом высоты над уровнем моря). На рис. 3 показан этот процесс в упрощенной форме (только в двух измерениях).

Точность

Достижимая точность зависит от положения спутников, сигнал от которых может быть принят, относительно автомобиля. Чем больше пространственный угол спутника относительно автомобиля, тем лучше условия определения положения. Достижимая точность в плане - приблизительно 3–5 м, а по высоте - приблизительно 10–20 м.

В зонах высотной застройки спутниковые сигналы могут быть приняты только, если спутники расположены, в значительной мере, на одной линии, т.е. в направлении улицы. Однако, в этом случае пространственный угол между направлениями на спутники очень мал, и определение положения неточное.

Ошибки в определении положения могут возникать в результате отражения спутниковых сигналов, например, от железобетонных стен зданий.

Определение направления движения

Направление движения можно легко определить по разнице частот принятых сигналов, вызванной эффектом Допплера. Когда автомобиль движется по направлению к спутнику, GPS-приемник получает сигнал увеличенной частоты. С обратной стороны спутника приходит сигнал уменьшенной частоты. Начиная со скорости приблизительно 30 км/ч, этот эффект достаточно заметен при определении направления.

Навигационное счисление

Навигационное счисление позволяет определять положение даже, если сигналы GPS не принимаются, например, в туннеле. При этом добавляются циклически записываемые элементы по дальности в виде вектора по величине и направлению. Сигнал от спидометра передается через шину CAN для измерения пройденного расстояния. Изменения направления движения считываются датчиком курса. Таким образом, рассчитывается направление движения, начиная с последнего абсолютного определения направления, по последним полученным сигналам GPS на основе эффекта Допплера.

Корреляционное определение по карте

Процедура, именуемая «корреляционное определение по карте», состоит в постоянном сравнении расчетного положения с маршрутом, проложенным на цифровой карте. Таким образом, точное положение автомобиля может быть показано на карте даже, если расчетное положение неточное (неточность может быть вызвана, например, отсутствием сигнала GPS и ошибками в навигационном счислении). Таким образом, рекомендации по выбору маршрута могут быть поданы в наиболее удобной форме. Кроме того, можно скомпенсировать ошибки датчиков и накапливаемые ошибки навигационного счисления.

Рис. 2. GPS - Система глобального позиционирования:
1–24 – спутник для определения положения автомобиля



Рис. 3. Определение положения; система GPS
(Упрощенный вид в двух измерениях).
Если известны положения спутников, возможные точки приема находятся на окружностях вокруг спутников, в соответствии со временем задержек сигналов t_1 и t_2. Точка пересечения A на поверхности Земли – это искомая точка



Ввод пункта назначения

Пункт назначения можно задать, например, через кнопочную панель устройства навигации, прямо через сенсорный экран или при помощи голосовой команды. Пользователь вводит все необходимые данные через меню или в ответ на запросы голосовой системы коммуникации.

Цифровая карта дорожной сети содержит справочник маршрутов, позволяющий вводить в систему адрес пункта назначения. Для этого нужно иметь список всех известных названий. В свою очередь, эти списки содержат также названия дорог и улиц. Чтобы задать адрес более точно, пользователь может указать конкретный перекресток или номер дома.

Пункт назначения можно быстро ввести из памяти, где хранятся прежние пункты назначения, которые можно вызвать снова (например, пункт назначения, записанный в категории «избранное»).

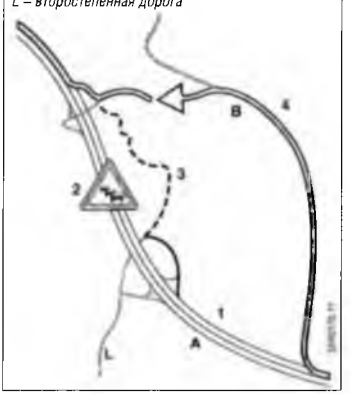
Аэропорты, вокзалы, заправки, многоэтажные парковки и т.д. записаны в тематических списках (POI, интересные места). При помощи этих списков можно, например, найти близлежащую заправку или многоэтажную парковку (рис. 4).

Во многих навигационных системах пункт назначения можно отметить на дисплее по карте (например, при помощи сенсорного экрана).

Рис. 4. Пример показа карты с указанием POI (интересные места)



Рис. 5. Динамическая маршрутизация:
1 – первоначальный основной маршрут, 2 – затор; 3 – альтернативный маршрут, заданный водителем; 4 – наилучший альтернативный маршрут, рассчитанный системой динамической маршрутизации; A – междугородная/скоростная трасса, B – трасса государственного значения; L – второстепенная дорога



Расчет маршрута

Стандартный расчет

Начиная с текущей позиции, навигационное устройство рассчитывает маршрут к заданному пункту назначения. Способ расчета может выбираться в соответствии с предпочтениями пользователя. Можно задать различные опции, такие как, например, оптимизация маршрута:

- на основе времени поездки;
- на основе критерия экономичности времени и расстояния поездки;
- на основе заданного минимального расхода топлива;
- в обход шоссейных дорог, паромных переправ или платных дорог.

Рекомендации по выбору маршрута выдаются в течение нескольких секунд после введения пункта назначения. Рассчитывается также сценарий, если водитель отклоняется от рекомендованного маршрута. Новые рекомендации выдаются до того, как водитель доедет до следующего перекрестка.

Динамический выбор маршрута

Многие радиостанции передают сообщения о дорожной ситуации не только в виде речевых сообщений, но и в форме кода. Для этой цели существует стандарт «ALERT-C» для канала транспортной информации (TMC). Информация TMC передается по системе радиоданных (RDS) в диапазоне FM.

В кодированных сообщениях, кроме прочего, содержатся указания на места автомобильных пробок, их серьезность, фактическую длину и причины. Система навигации может получить такое кодированное сообщение и определить, не находится ли пробка на выбранном маршруте. Если так, то маршрут расчитывается заново, с поправкой на большее время прохождения участка с пробкой. Можно выбрать обходной маршрут (рис. 5). По новому маршруту будут новые рекомендации.

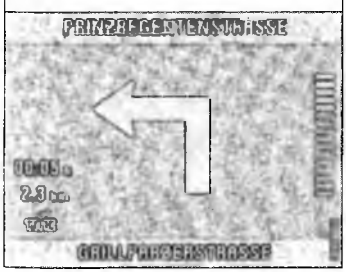
Кодированные сообщения системы TMC передаются только для главных трасс.

Проведение по маршруту

Рекомендации по маршруту

Маршрутизация выполняется путем сравнения текущего местоположения автомобиля с вычисленным маршрутом. Рекомендации по маршруту обычно даются в звуковой (голосовой) форме. Это позволяет водителю не отвлекаться от дороги. Одновременно с этим в комбинации приборов – в главном поле зрения водителя – должны отображаться простые графики для оказания помощи в понимании направления движения. Эти графики могут быть в виде простых стрелок (рис. 6) или в виде полноценной карты в нужном масштабе (рис. 4).

Рис. 6. Пиктограмма как пример представления маршрута



Цифровая карта

Дисплей карты

В зависимости от системы, карта на цветном дисплее может показываться в масштабе приблизительно 1:2 000 в 2D, перспективном 2D (псевдо 3D) или истинном 3D. В таком виде удобнее оценить весь маршрут или его участок. Дополнительная информация, такая как, например, реки или озера, железные дороги или леса, облегчает ориентирование.

Оцифровка

Карты и аэрокосмические фотографии высокого разрешения являются основой создания цифровых изображений. Если эти изображения устарели или недостаточно точны, проводятся полевые исследования. Оцифровка ведется вручную на основе картографического материала и аэрокосмических снимков. Затем в базы данных добавляются названия и классификация объектов (например, улицы, водные пространства, границы).

По улицам движутся специальные автомобили, записывающие характеристики, связанные с дорожным движением (например, односторонние дороги, ограничения проезда, мосты и туннели, запреты на поворот на перекрестках); затем данные оцифровки проверяются на месте. Данные, собранные таким способом, добавляются в базы данных и используются в цифровых картах.

Память данных

Диски DVD благодаря их большей в семь раз емкости, в настоящее время вытеснили диски CD в роли носителя цифровых карт. С другой стороны, новые системы теперь используют жесткие диски или SD-карты (последние явно преобладают для портативных систем). Эти средства записи информации предоставляют дополнительные возможности оптимизации навигационных систем в соответствии с предпочтениями пользователей.

Адаптивный круиз-контроль

Функция

Как и базовая система круиз-контроля, которая в течение многих лет поставлялась в виде компонента стандартной комплектации, система «адаптивного круиз-контроля» (ACC) может считаться системой повышения безопасности. Контроллер скорости автомобиля регулирует скорость движения до требуемой величины, заданной водителем, при помощи органа управления системы круиз-контроля. В дополнение к этой функции, адаптивный контроллер скорости автомобиля анализирует информацию об относительной скорости и расстоянии до впереди идущего автомобиля, а также о дополнительных параметрах движения управляемого вами автомобиля (например, угол поворота, скорость поворота) и использует данные для регулирования расстояния между автомобилями. Таким образом, регулируется скорость и поддерживается безопасное расстояние до идущего впереди автомобиля. Адаптивный контроллер скорости автомобиля оборудован радаром дальнего действия, чтобы обнаруживать автомобили, движущиеся впереди по той же полосе, а также препятствия, движущиеся в пределах дальности действия датчиков и требующие применения тормозов автомобиля (рис. 1).

Конструкция и функция

Адаптивный контроллер скорости автомобиля – это система, избавляющая водителя от необходимости выполнять рутинные действия, но не от обязанности управлять автомобилем. Поэтому водитель может в любой момент взять под контроль функцию управления, вмешавшись в ее работу или отключив ее (например, работая педалью акселератора или тормоза).

Датчик измерения расстояния

Современные системы адаптивного круиз-контроля (ACC) обычно оборудованы радарным датчиком, работающим в диапазоне частот 76–77 ГГц (см. раздел «Датчики»). Лучи радара, излучаемые радарным датчиком, отражаются от идущих впереди автомобилей; анализируется их время возвращения, допплеровский сдвиг и соотношение амплитуд. Эти величины используются для расчета расстояния, скорости и углового положения идущих впереди автомобилей. Электронные компоненты для анализа и управления (блок проверки радара) смонтированы в корпусе датчика. Они обмениваются данными через шину данных CAN с другими электронными блоками, отслеживающими скорость двигателя и действие тормозов (рис. 2).

Рис. 1 Компоненты системы адаптивного круиз-контроля (ACC) в легковом автомобиле (пример):
1 – блок управления двигателем; 2 – блок управления радарным датчиком;
3 – активное вмешательство в торможение при задействовании системы стабилизации движения (ESP);
4 – блок управления и индикации;
5 – вмешательство в управление двигателем (для двигателей с искровым зажиганием и электронным управлением дроссельной заслонкой),
6 – датчики;
7 – вмешательство в управление трансмиссией (опция)



Имеются также системы адаптивного круиз-контроля (ACC), использующие лазерные лучи инфракрасного диапазона (лидар). Принцип работы тот же, но при этом следует учитывать ограничение функциональности оптического зондирования в плохую погоду (туман, дождь, снег), по сравнению с радарным зондированием.

Курсовая устойчивость

Для обеспечения надежной работы системы ACC в любых условиях, например, на поворотах, важно, чтобы можно было ассоциировать впереди идущие автомобили с определенными полосами движения. Для этого информация от датчиков электронной Системы стабилизации движения ESP (угловая скорость поворота, угол поворота рулевого колеса, частота вращения колес и поперечное ускорение) анализируется в отношении фактической кривой движения транспортного средства, оснащенного ACC.

Ввод данных

Водитель вводит необходимую скорость движения и желаемый временной интервал, который может устанавливаться в диапазоне от 1 до 2 секунд. Временной интервал до впереди идущего автомобиля рассчитывается по сигналам от радара и сравнивается с временным интервалом, заданным водителем. Если временной интервал меньше заданного, система адаптивного круиз-контроля отвечает сообразно дорожной обстановке, сперва понижая обороты двигателя, а затем, при необходимости, автоматически задействуя тормоза автомобиля. Если заданный временной интервал превышен, автомобиль ускоряется до тех пор, пока не будет достигнута скорость впереди идущего автомобиля или скорость, заданная водителем.

Управление работой двигателя при круиз-контроле

Управление скоростью требует наличия электронной системы управления двигателем. Эта система позволяет разгонять автомобиль до требуемой скорости или, при появлении препятствия, затормаживать его посредством автоматически управляемого акселератора (регулирования оборотов и тяги).

Включение тормозов

Если торможения двигателем недостаточно, следует применить тормоза. Для этого легковой автомобиль должен иметь модуль электронной системы стабилизации движения (ESP), которая может задействовать тормоза. Для коммерческого транспорта достаточно иметь электронную тормозную систему (EBS). Обычно также используются имеющиеся средства снижения скорости или торможения двигателем для уменьшения износа.

Поскольку система адаптивного круиз-контроля (ACC) конфигурируется, как система повышения комфорта, в настоящее время за-

Рис. 2. Принципиальная схема системы адаптивного круиз-контроля (ACC)



медление, управляемое контроллером, ограничено величиной приблизительно 2–3 м/с^2. Если этого оказывается недостаточно, в связи с текущей дорожной обстановкой (например, впереди идущие автомобили резко тормозят), водителю подается визуальный и акустический сигнал о том, что он должен взять управление на себя. Тогда водитель проводит торможение обычным образом. Система адаптивного круиз-контроля не включает в себя функции безопасности дорожного движения, такие, как экстренное торможение.

При необходимости, при активированной системе адаптивного круиз-контроля, системы ABS или ESP действуют в нестандартном режиме. В зависимости от настроек системы адаптивного круиз-контроля, вмешательство систем ABS, TCS или ESP может привести к отключению системы адаптивного круиз-контроля.

Дисплей

Водитель должен получать, как минимум, следующую информацию:

- индикация заданной скорости;
- индикация состояния систем;
- индикация желаемого временного интервала движения, выбранного водителем;
- индикация режима «преследования», информирующая водителя, действительно ли система контролирует расстояние до выявленного объекта.

Эта информация может быть выведена, например, на приборную панель или на ветровое стекло (рис. 3) (см. раздел «Индикация на ветровом стекле»).



Рис. 3. Информация, отображаемая на ветровом стекле:
1 – текущая скорость; 2 – требуемая скорость; 3 – статус системы адаптивного круиз-контроля (ACC)

Алгоритмы управления

Модули управления

В общем виде система управления и для легковых, и для грузовых автомобилей состоит из трех модулей управления.

Круиз-контроль

Если радарный датчик не обнаружил впереди идущих автомобилей, система поддерживает скорость автомобиля, заданную водителем.

Система управления тяговым усилием

Радарный датчик обнаружил впереди идущие автомобили. Система поддерживает постоянный временной интервал до ближайшего автомобиля на постоянной величине.

Управление при поворотах

На крутых поворотах радарный датчик может «потерять» впереди идущий автомобиль ввиду ограниченного угла обзора. До тех пор, пока этот автомобиль не появится в поле зрения радара снова или пока система не переключится в нормальный режим круиз-контроля, система принимает особые меры. В зависимости от марки автомобиля, скорость, например, может поддерживаться постоянной, регулируется боковое ускорение, или система адаптивного круиз-контроля отключается.

Обнаружение объектов и закрепление их за полосами движения

Основная задача радарного датчика и его электронных систем в том, чтобы обнаруживать объекты и закреплять их за соответствующими полосами движения: за той же, на которой находится собственный автомобиль, или за другой. Такое закрепление объектов за их полосами движения требует точности обнаружения впереди идущих автомобилей (с высоким разрешением), а также точного знания параметров движения собственного автомобиля. Решение относительно того, какой из обнаруженных объектов будет использоваться системой адаптивного круиз-контроля в качестве опорного, основано, главным образом, на сравнении между положениями и параметрами движения выявленных объектов и движением собственного автомобиля. В данном случае, в особенности для коммерческих автомобилей, не обязательно выбирать ближайший впереди идущий автомобиль в качестве опорного объекта. При некоторых условиях может быть

более разумно выбирать второй автомобиль, а не ближайший, например, если легковой автомобиль вклинивается с соседней полосы и продолжает ускоряться, чтобы перестроиться обратно.

Электронная структура

Кроме данных, получаемых от датчиков (рис. 2), система адаптивного круиз-контроля (ACC) требует дополнительных данных о работе двигателя, системе замедления (для коммерческих автомобилей), блоков управления трансмиссией и ESP; эти данные передаются по шине данных CAN. С другой стороны, эти блоки управления преобразуют ускорения, задаваемые системой адаптивного круиз-контроля в сигналы для двигателя и тормозов. Координация управляющих сигналов (например, соотношение между требуемым торможением и возможностями тормозной системы) может происходить или в блоке ESP, или в управляющем компьютере, или собственно в системе адаптивного круиз-контроля (ACC).

Регулировка

Радарный датчик установлен в передней части автомобиля. Направление сканирования радара сориентировано вдоль продольной оси автомобиля. Это направление регулируется винтами, находящимися в месте крепления датчика. Если направление сбито под воздействием физических факторов, например, из-за деформации места установки, или по иной причине, требуется провести новую регулировку. Регулировка на незначительные отклонения производится автоматически, через алгоритмы, запрограммированные в программном обеспечении. Если требуется ручная регулировка, сообщение об этом посылается водителю.

Сфера применения и перспективы новых разработок

Легковые автомобили

Использование системы адаптивного круиз-контроля (ACC) увязано с наличием электронной стабилизации движения (ESP). Это – требование для применения активного торможения без участия водителя.

Грузовые автомобили

Торможение

Стандартная тормозная система начинает участвовать в торможении только тогда, когда имеющиеся средства замедления (или торможение двигателем) более недостаточны для замедления автомобиля в том режиме, который предписан системой адаптивного круиз-контроля. Поэтому износ тормозов, вызываемый системой адаптивного круиз-контроля, находится на том же уровне, как при управлении водителем, обладающим плавной манерой езды.

Наряду с описанными системами адаптивного круиз-контроля, имеются системы ACC, которые управляют только оборотами двигателя или ускорением и торможением двигателем. Для таких систем диапазон применения ограничен существенно меньшим возможным замедлением, т.е. водитель вынужден чаще вмешиваться в управление.

Конструктивные требования

В общем виде и для автобусов, и для грузовиков, и для тракторов пригодна одна и та же система адаптивного круиз-контроля (ACC). Такая система покрывает все требования относительно двигателей и тормозных систем, механических, полуавтоматических и автоматических коробок передач. Единственное значимое различие в конфигурации – для автобусов, в особенности – в отношении требований комфорта.

Некоторые основные требования к системам адаптивного круиз-контроля для коммерческих автомобилей существенно отличаются от требований к системам для легковых автомобилей:

- Требования к параметрам ускорения и торможения должны учитывать значительные различия в весе транспортных средств и мощности двигателя.
- Маневры обгона и перестроения для грузовиков происходят гораздо медленнее для грузовиков, чем для легковых автомобилей, что определяет различные требования к управлению и настройкам.
- Динамика управления должна быть адаптирована к ситуации, когда несколько

автомобилей, оборудованных системами адаптивного круиз-контроля, движутся вместе в колонне.
- Задача несколько упрощается в связи с тем, что грузовики имеют меньший диапазон скоростей, чем легковые автомобили.
- Коммерческое применение грузовых автомобилей означает, что основной упор при конфигурировании их систем делается на экономичность, а не на спортивные качества или комфорт. Расход топлива и износ с применением систем адаптивного круиз-контроля должен быть, как минимум, не хуже, чем при управлении средним водителем.

Перспективы развития систем адаптивного круиз-контроля (ACC)

Система адаптивного круиз-контроля «ACC plus»

Прежние системы адаптивного круиз-контроля имели функциональные ограничения, вызванные ограниченными возможностями датчиков и контроллеров. Ограниченная дальность и горизонтальная разрешающая способность приводили к тому, что системы были применимы только при скоростях свыше 30 км/ч. Поэтому раньше системы адаптивного круиз-контроля не могли применяться на меньших скоростях и на стоянке. Система адаптивного круиз-контроля «ACC plus» (находящаяся в серийном производстве, начиная с 2009 года) оборудована радарным датчиком с более широким угловым покрытием (±15°) и улучшенными способностями по обнаружению объектов, поэтому она работает и при торможении до остановки и трогании с места под управлением водителя. Чтобы вновь активировать такую систему, достаточно нажать на педаль акселератора в течение заданного интервала времени.

Благодаря своей большей гибкости и хорошей способности обнаруживать объекты на близком расстоянии, такая система адаптивного круиз-контроля может использоваться также и в дорожной пробке.

Система адаптивного круиз-контроля с отслеживанием по малым скоростям

Система адаптивного круиз-контроля «ACC LSF» (LSF: Отслеживание по малым скоростям), создана на основе системы адаптивного круиз-контроля «ACC plus». Данные от датчика радара дальнего действия в сочетании с данными от датчиков средней и малой дальности (датчиков радара ближнего действия и ультразвуковых датчиков) используются для обеспечения большей надежности обнаружения объектов перед автомобилем по всей его ширине. Система адаптивного круиз-контроля «ACC LSF» работает в диапазоне скоростей 0–200 км/ч, может затормозить автомобиль до полной остановки и автоматически включается снова через заданный промежуток времени.

Соединение системы адаптивного круиз-контроля (ACC) с системой навигации

На базе цифровых карт возможно предсказание поворотов дороги. В данном случае можно, например, определить задание «через 50 м поворот», используя процессы интерполяции на основе существующих точек данных. В данном принципе могут содержаться проблемы, вызванные неточностью самих цифровых карт, или если карта не соответствует фактическому местоположению на дороге. Однако, качество оцифровки карт постоянно повышается. В будущем дополнительные функции станут возможны с добавлением дополнительной информации (такой, как количество полос или тип дороги).

Сочетание данных от датчиков с видеоданными

Сочетание данных от датчиков с данными от видеокамеры помогает обнаруживать и классифицировать объекты. Это позволяет управлять автомобилем, ориентируясь также и на неподвижные объекты.

Сочетая возможности системы адаптивного круиз-контроля «ACC LSF» с видеотехнологиями, в будущем станет возможно обеспечивать полную линейную маршрутизацию во всех диапазонах скоростей, а также и в условиях движения по городу (FSR: полный диапазон скоростей).

Система адаптивного круиз-контроля (ACC) также может быть основой для разработки вспомогательных систем, автоматически вмешивающихся в управление в опасных ситуациях, чтобы избежать аварий или свести к минимуму их последствия (см. ниже раздел «Предсказывающие системы экстренного торможения»). Перспективные разработки касаются автоматического маневрирования при помощи рулевого управления для предупреждения аварий.

Список литературы

[1] Winner, H.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg-Verlag, 2009.

[2] Wallentowitz, H.; Reif, K.: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Vieweg-Verlag, 2007.

[3] Braess, H.H.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg-Verlag, 2007.

Предсказывающие системы экстренного торможения

Пассивные системы безопасности (защита водителя и пассажиров) уже высоко развиты и доказали свою эффективность постоянным уменьшением летальных исходов при авариях. «Предсказывающие» системы, которые определяют неизбежность аварии заранее, наиболее эффективным образом обеспечивают важный необходимый запас времени для управляющих систем для принятия мер к защите водителя и пассажиров при аварии.

Внедрение активных систем безопасности опирается на систему адаптивного круиз-контроля (ACC), т.е. имеющиеся радарные датчики используются также и в новых системах повышения безопасности дорожного движения.

Для применения функций активного повышения безопасности дорожного движения с высокой эффективностью – таких, как активное маневрирование для предотвращения аварий в любых ситуациях – требуется внедрять «предсказывающие» системы экстренного торможения (PEBS). Эти вспомогательные системы выявляют опасные ситуации на основании положения и относительного движения объектов и, исходя из этого, выдают предупреждения и производят активное торможение. Они постоянно задействованы, даже, если система адаптивного круиз-контроля выключена. Процесс разработки таких систем экстренного торможения прошел три стадии.

Стадии развития систем экстренного торможения

«Предсказывающие» системы предупреждения о столкновении

Функция «предсказывающей» системы предупреждения о столкновении (PCW) дает водителю предупреждение о столкновении визуальными, акустическими и кинестетическими средствами. Она позволяет и внимательному, и невнимательному водителю заранее осознать опасность.

Помощь в экстренном торможении

Функция помощи в экстренном торможении (EBA) включает в себя функцию «предсказывающего» предупреждения о столкновении. Эта функция усиливает частичное применение тормозов (вызванное неправильной оценкой со стороны водителя или его неопытностью) в критических ситуациях до полного применения тормозов, если это диктуется опасной ситуацией, выявленной радарным датчиком.

На рис. 1 (средняя часть) показана модель отклика системы на примере столкновения сзади. Когда радар выявляет риск столкновения сзади, тормоза приводятся в готовность, и водителю подается предупреждение сперва звуковым сигналом, а затем кратковременным задействованием тормозов так, чтобы до аварии остался достаточный для реагирования промежуток времени, составляющий обычно приблизительно 1,5 с, и водитель мог среагировать самостоятельно. Как только водитель начинает торможение, усилие на тормозе автоматически увеличивается так, чтобы избежать столкновения с обнаруженным объектом.

Автоматическое экстренное торможение

Функция автоматического экстренного торможения (AEB) включает в себя две описанные выше функции и самостоятельно проводит дополнительное торможение, если водитель не реагирует на предупреждение, и столкновение становится неизбежным.

При автоматическом экстренном торможении вмешательство происходит по нарастающей (рис. 1, внизу). Вслед за кратковременным задействованием тормозов применяется автоматическое частичное торможение с замедлением 3 м/с^2, чтобы дать водителю больше времени на реакцию. Если водитель начинает торможение, функция помощи в экстренном торможении нарастает постепенно.

Если реакция водителя ограничивается снятием ноги с педали акселератора, частичное торможение нарастает до величины 6 м/с^2. И, наконец, если водитель все еще не реагирует (и столкновение становится неизбежным), автоматически применяется полное торможение, чтобы свести к минимуму последствия столкновения.

Автоматическое управление этой функцией транспортного средства требует высокой степени надежности в идентификации объектов и оценке риска аварии. Для еще более надежной оценки неизбежности столкновения можно использовать дополнительные измерительные системы, использующие радарные системы (сочетание данных от радара и видеокамеры).

Преимущества

Все эти функции не только улучшают средние показатели замедления автомобиля, но и заранее повышают давление в тормозной системе, поэтому тормоза срабатывают быстрее. В дополнение к этому, давление в тормозной системе распределяется оптимально в течение всего цикла экстренного торможения. Таким образом, транспортное средство тормозится максимально эффективно до полной остановки.

С введением этих мер становится возможно значительно уменьшить тормозной путь и уменьшить скорость в момент столкновения, что, в свою очередь, может значительно уменьшить опасность травм.

Законодательные и нормативные акты

До настоящего времени были одобрены для установки на легковых автомобилях только такие системы автоматического экстренного торможения, которые срабатывают, когда авария неизбежна, т.е. только системы, уменьшающие тяжесть последствий аварии. Во многих ситуациях, однако, в качестве альтернативы полному торможению водитель легкового автомобиля может инициировать занос. Таким образом, функция полного торможения системы экстренного торможения может противоречить намерениям водителя. Однако, такое вмешательство системы запрещено Международной Венской конференцией. Поэтому следует дополнительно прояснить требования законодательства в отношении применения систем, имеющих такую функцию, на дорогах общего пользования.

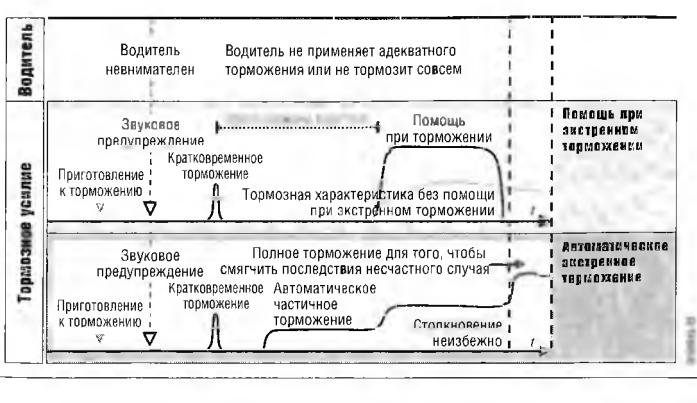
С другой стороны, грузовые автомобили обычно не могут производить маневр заноса, поскольку это может вызывать их опрокидывание. В этом случае применение полного торможения – это единственный способ предотвратить аварию. Поэтому Германское Федеральное агентство по регистрации транспортных средств (KBA) одобрило применение таких систем на грузовых автомобилях.

Торможение после аварии

При столкновениях в заднюю часть автомобиля часто случается, что автомобиль, который ударили сзади, бросает вперед, и он вызывает дополнительные повреждения, или сам съезжает с дороги. В будущем датчики столкновения будут способны выявлять такую ситуацию и применять торможение, чтобы остановить такой автомобиль (торможение во время столкновения). Это позволит избежать вторичных повреждений. В результате первого столкновения водитель часто оказывается неспособен принять быстрые и оптимальные меры.

Рис. 1. Модель отклика тормозной системы для функций помощи при экстренном торможении и автоматического экстренного торможения для невнимательного водителя, который не применяет адекватного торможения или совсем не применяет торможения

Система EBA предупреждает водителя и начинает процесс торможения, управляемый водителем. Система AEB автоматически применяет торможение, увеличивая, таким образом, запас времени и уменьшая последствия аварии



Системы повышения безопасности на основе видео

Видеодатчики играют важную роль в системах повышения безопасности, поскольку с их помощью интерпретируется визуальная информация (классификация объектов). В качестве простейшего примера, видеодатчики, установленные в задней части автомобиля, могут использоваться как дополнительная система в помощь ультразвуковой системе помощи при парковке. В системах ночного видения зона перед автомобилем освещается инфракрасным прожектором и снимается на переднюю камеру, откуда изображение передается в салон автомобиля. Другие системы повышения безопасности обрабатывают видео сигналы и извлекают из них информацию, используемую в тех или иных независимых функциях (например, предупреждение о сходе с полосы движения), или в качестве дополнительной информации для других функций (сочетание данных от разных датчиков).

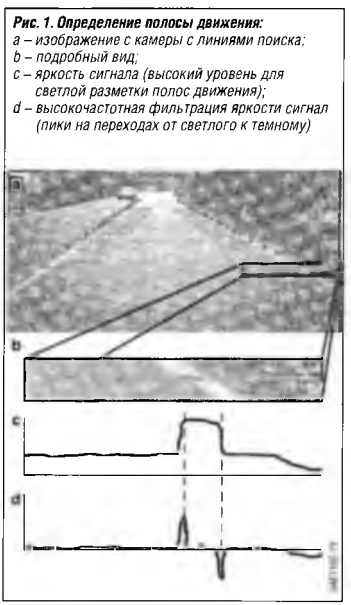


Рис. 1. Определение полосы движения:
a – изображение с камеры с линиями поиска;
b – подробный вид;
c – яркость сигнала (высокий уровень для светлой разметки полос движения);
d – высокочастотная фильтрация яркости сигнал (пики на переходах от светлого к темному)

Предупреждение о сходе с полосы движения и помощь в удержании на полосе движения

Непреднамеренный уход с полосы движения - это одна из наиболее распространенных причин аварий. Чаще всего это бывает вызвано усталостью водителя («микросон») или тем, что его внимание отвлекли. Предупреждение о сходе с полосы движения призвано бороться с такими ситуациями путем идентификации разметки впереди и подачи предупреждения водителю, если есть вероятность того, что автомобиль пересечет разметку полосы движения, а сигнал поворота не был включен.

Системы предупреждения о сходе с полосы движения (LDW) используют видеокамеры и могут быть как моно-, так и стереосистемами. В хороших погодных условиях и при качественной разметке полос движения дальность действия моносистемы – порядка 40 м или немного больше; для стереосистемы дальность больше на 10–20 %. До настоящего времени только моносистемы нашли себе нишу на рынке, из соображений цены.

На рисунке 1 показан принцип определения полос движения. Система обработки изображения ищет разметку полос движения, анализируя различия в контрасте между разметкой полос движения и поверхностью дороги. На рисунке 1, a показано изображение с камеры с линиями поиска; на рисунке 1, b показан подробный вид. На рисунке 1, a крестиками отмечено направление полосы движения, рассчитанное компьютером для обработки изображений. Для выявления линии анализируется яркость сигнала внутри линии поиска (рис. 1, c). Границы маркировки полос движения определяются при помощи высокочастотной фильтрации (рис. 1, d).

Предупреждение для водителя можно сгенерировать на основании этих сигналов, если автомобиль уходит с полосы движения. Здесь рассматриваются различные формы подачи предупреждения. Звуковое предупреждение через динамики автомобиля в виде предупредительного сигнала (при помощи стереосигнала можно также указать направление) или «звук от профилированной обочины» можно считать эффективными формами предупреждения. Недавно разработаны тактильные датчики для таких предупреждений. В конце



Рис. 2. Опознавание дорожных знаков:
а – изображение дороги;
б – символы на графическом дисплее приборной панели

2004 года поступила в серийное производство система с вибрацией кресла (с информацией о направлении). В 2009 году начался серийный выпуск системы с вибрацией рулевого колеса или легкого сопротивления руля в требуемую сторону.

Преимущество подачи предупреждения непосредственно на рулевое колесо в том, что водитель напрямую ассоциирует опасность с движением руля.

Следующая ступень на пути к автоматическому поддержанию направления (помощь в удержании полосы движения с активным вмешательством в рулевое управление) больше не выглядит слишком фантастичной в свете сказанного. Однако, в соответствии с действующими нормативными актами, допускается, чтобы такая система была активна только в том случае, если водитель держит обе руки на руле. Кроме того, у водителя всегда должен быть приоритет перед системой.

Опознавание дорожных знаков

Видеокамера регистрирует окружающую обстановку и передает видеосигнал компьютеру для обработки изображений. Во время движения автомобиля система постоянно ищет объекты, которые, судя по их форме, могут быть дорожными знаками. Когда такой объект найден, он отслеживается до тех пор, пока не окажется достаточно близко, чтобы снять его на видеокамеру. Опознавание дорожных знаков предполагает, что компьютер для обработки изображений «обучили» этим знакам.

Ограничение скорости, опознанное и обработанное компьютером для обработки изображений (рис. 2), подается на приборную панель и показывается в виде символа на графическом дисплее. Если водитель не соблюдает это ограничение скорости, система может подать дополнительное звуковое или тактильное предупреждение.

Надежное опознавание дорожных знаков сейчас возможно на скоростях до 160 км/ч, а также в условиях дождя и умеренной дымки над дорожным покрытием.

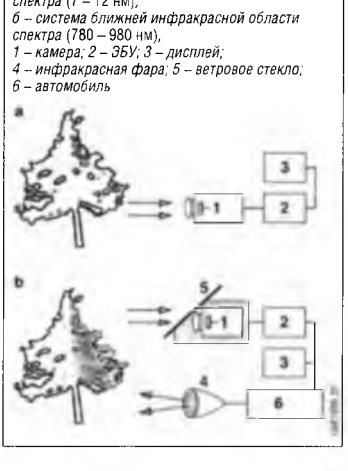
Системы ночного видения

Применение

В темное время суток следующие два фактора накладывают ограничение на зрительные способности водителя. Во-первых, несмотря на современные источники освещения такие, как галогенные или ксеноновые лампы, освещенная зона остается достаточно ограниченной. Например, дальность освещения от обычной фары ближнего света составляет всего 40–50 м. Хотя включение дальнего света позволяет увеличить дальность обзора до 120–150 м, дорожная ситуация (ослепление фарами встречных машин) не позволяет пользоваться им слишком часто.

Во-вторых, цвет и контраст объектов в темноте и при дневном свете различны, а способность различать объекты в темноте часто значительно уменьшена. Пешехода в темной одежде, например, обычно трудно заметить, даже, если он находится в пределах дальности ближнего света фар. Поэтому системы ночного видения помогают повысить безопасность дорожного движения.

Рис. 1. Сравнение систем дальней и ближней инфракрасной области спектра:
а – система дальней инфракрасной области спектра (7 – 12 нм),
б – система ближней инфракрасной области спектра (780 – 980 нм),
1 – камера; 2 – ЭБУ; 3 – дисплей;
4 – инфракрасная фара; 5 – ветровое стекло;
6 – автомобиль



Системы дальней инфракрасной области спектра

Принцип действия

Системы ночного видения, работающие в дальней инфракрасной области спектра (FIR) используются в военной области уже многие годы. В области гражданского автомобилестроения они впервые были применены в 2000 году в США. В них используется инфракрасная камера, которая обнаруживает тепловое излучение объектов в диапазоне длин волн 7–12 мкм (рис. 1, а). Таким образом, это – пассивные системы, не требующие дополнительных источников излучения для подсвечивания объектов.

Пироэлектрическая инфракрасная камера или микроболометрическая камера (камера, обнаруживающая сердечные сокращения) чувствительна только в диапазоне длин волн 7–12 мкм. Поскольку ветровое стекло непрозрачно для этих длин волн, камера должна быть установлена снаружи автомобиля.

В инфракрасных камерах используются рассеиватели на основе германия. В настоящее время в разработке находится стекло марки «TeX» с высоким содержанием германия и соответствующей дальностью передачи излучения.

Имеющиеся на данный момент камеры имеют разрешающую способность QVGA (четвертичная логическая матрица видеографики, 320 × 240 пикселов). Сигналы, поступающие от камеры, обрабатываются в ЭБУ. Получаемый сигнал видеодиапазона передается на дисплей, установленный, например, в комбинации приборов; на нем можно увидеть тепловое изображение.

Видеодисплей

Тепловые объекты показываются на изображении в виде световых контуров на темном (холодном) фоне (рис. 2, а), причем, контрастность увеличивается в зависимости от температурной разницы между объектом и окружающим воздухом. Однако изображение на видеодисплее выглядит довольно нетипично, т.к. отличается от обычной картины, видимой глазами.

Системы ближней инфракрасной области спектра

Принцип действия

Системы ближней инфракрасной области спектра (NIR) измеряют тепловое излучение с длинами волн, близкими к видимому спектру. Однако, объекты не производят излучения в этом диапазоне длин волн. Поэтому применяется подсветка инфракрасными фарами (рис. 1, b). Таким образом, такие системы являются активными. Инфракрасная камера воспринимает изображение, т.е. инфракрасное излучение, отраженное от объектов. Изображение передается в ЭБУ, откуда, в свою очередь, обработанное изображение отправляется на дисплей (например, на приборной панели). Водитель видит изображение текущей дорожной обстановки (рис. 2, b).



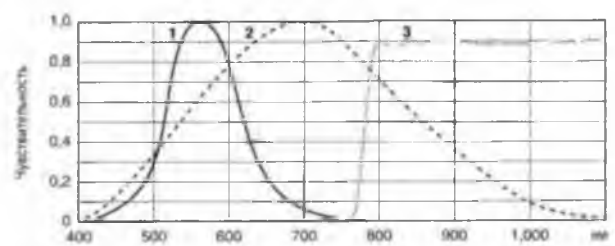
Рис. 2. Сравнение наружного вида систем дальней и ближней инфракрасной области спектра: *a – система дальней инфракрасной области спектра; b – система ближней инфракрасной области спектра*

Системы на основе NIR впервые были внедрены в 2003 году в Японии, с упрощенным изображением на видеодисплее и с использованием традиционных технологий ПЗС-камер (CCD). В 2005 году система ночного видения на основе NIR со значительно улучшенными характеристиками была впервые установлена на автомобилях марки «Mercedes S-Class» (система ночного видения).

Принцип работы

Системы ночного видения в ближней инфракрасной области спектра используют различие в спектральной чувствительности человеческого глаза и электронной камеры на кремниевой основе. Спектральная чувствительность человеческого глаза описывается кривой $V(\lambda)$ (рис. 3) и действует в диапазоне длин волн от 380 нм (фиолетовый) до 780 нм (красный). Максимальная чувствительность проявляется на длине волны 550 нм (зеленый). По сравнению с этим, спектральная чувствительность камеры простирается гораздо дальше в сторону длинных волн, вплоть до 1000 нм.

Рис. 3. Спектральная чувствительность:
1 – кривая спектральной чувствительности $V(\lambda)$ человеческого глаза (кривая дневного зрения), 2 – спектральная чувствительность видеокамеры, 3 – спектральная передача фильтра



Инфракрасные фары

Галогенные лампы, обычно используемые в автомобильных фарах, имеют высокую долю инфракрасного излучения. Оно простирается от пределов видимого спектра (380–780 нм) до длин волн 2000 нм и выше, с максимумом между 900 и 1000 нм. Верхний предел чувствительности кремниевых элементов видеокамеры – 1100 нм.

Обычные галогенные фары дальнего света используются в качестве инфракрасных фар. На них устанавливается дополнительный фильтр на пути луча, который задерживает видимый свет, не сильно уменьшая полезную инфракрасную составляющую (рис. 3). Человеческий глаз не видит такое излучение

Такие инфракрасные фары имеют сходную дальность и углы освещения также как у обычных фар дальнего света; таким образом, достигается сходная дальность обзора, но при этом свет не слепит других участников движения (рис. 5).

Рис. 4. Принципиальная схема системы ночного видения:
1 – инфракрасная фара; 2 – ЭБУ; 3 – ветровое стекло, передающее в инфракрасном диапазоне, 4 – видеокамера, чувствительная в инфракрасном диапазоне; 5 – дисплей



Рис. 5. Дальность действия системы ночного видения:
1 – диаграмма (дисплей), 2 – фары ближнего света, 3 – инфракрасные фары дальнего света, 4 – дальность действия видеокамеры



К выбору характеристик фильтра предъявляются противоречивые требования. Спектральная чувствительность камеры уменьшается с увеличением длины волны. Чтобы суметь использовать ее рабочий диапазон, край фильтра для малых длин волн должен находиться близко к линии края видимого луча света. С другой стороны, для того чтобы фары не были красного цвета (что запрещено нормативно), край фильтра должен быть сдвинут к большим длинам волн. Можно удовлетворить обоим требованиям, тщательно выбирая интенсивность излучения в видимом диапазоне, положение края фильтра и угол его наклона.

Инфракрасные фары либо встраиваются в модуль фар, либо устанавливаются отдельно, например, на переднем бампере автомобиля (рис. 4).

Камеры

Неблагоприятные условия освещенности с высокими контрастами – темнота и очень яркий свет, например, от фар встречного транспорта – предъявляют очень высокие требования к защитным свойствам рассеивателя камеры, а также к самой камере. Чувствительность камеры в темноте определяет дальность действия системы обзора; динамика чувствительности в значительной мере определяется устойчивостью к ослеплению.

Чипы CCD (ПЗС: прибор с зарядовой связью) имеют очень хорошую чувствительность в темноте, но, как правило, обладают недостаточной динамикой светочувствительности без применения дополнительных мер. Имеющиеся чипы CMOS (КМОП: комплементарный металло-оксидный полупроводник) имеют немного меньшую чувствительность, зато их динамика светочувствительности достигает 100 дБ и выше. Благодаря регулируемым кривым с нелинейным характеристиками, эти камеры легко настраиваются для изменяющихся условий освещенности.

Подсвечивание дороги излучением в диапазоне длин волн между 700 и 1000 нм (инфракрасное излучение) дает для камеры полезный сигнал, зависящий от интенсивности освещения и спектральной отражательной способности окружающей обстановки.

Принцип включения

Один из важных аспектов работы камеры – это автоматическое включение инфракрасных фар. Они излучают свет высокой интенсивности, слишком яркий для человеческого глаза; в лучшем случае, человеческий глаз может воспринимать его в течение очень непродолжительного времени. Чтобы уберечь глаза от внезапного включения света на близком расстоянии, автоматическое включение инфракрасных фар происходит только, начиная с определенной скорости в дополнение к фарам ближнего света, которые уже включены. Если скорость падает ниже заданного порога, они автоматически выключаются. При этом исключается критическая комбинация длительного воздействия света и близости к его источнику. В дополнение к этому, инфракрасные фары включаются только в том случае, если фары ближнего света тоже включены. Таким образом, задействуется рефлекс моргания при взгляде на фары, что значительно уменьшает вред для глаз.

Характеристики системы

Системы, использующиеся до настоящего времени, выдают обработанное изображение с камеры (и в дальней, и в ближней инфракрасной области спектра) на монитор, имеющий достаточные графические возможности, установленный на приборной панели или на центральной консоли. В японских автомобилях также принято передавать изображение в индикационный блок на ветровом стекле.

При установке монитора в автомобиле важно найти такое место, чтобы он находился как можно ближе к ветровому стеклу или не слишком далеко от нормального поля зрения водителя, чтобы водителю не приходилось отвлекаться от дороги слишком надолго. В отношении последнего соображения, наилучшее положение монитора – на приборной панели.

Новые методики обработки изображений позволяют идентифицировать пешеходов по типичным очертаниям (область головы и плеч). Поэтому возможно высветить изображение пешехода на мониторе и облегчить водителю выявление опасной ситуации. Это особенно важно для систем дальней инфракрасной области спектра, поскольку изображение на них, в силу своей необычности, труднее интерпретировать, чем изображение с камеры в ближней инфракрасной области спектра. Это важно еще и потому, что большинство тяжелых аварий случается ночью. Таким образом, эти системы могут помочь значительно снизить количество ночных аварий с участием пешеходов. Такие системы с возможностью идентификации пешеходов, основанные на обеих технологиях (ближней и дальней инфракрасной области спектра), теперь устанавливаются в стандартной комплектации на автомобилях, производимых в Германии.

Перспективы дальнейшего развития

В будущем способность систем ночного видения идентифицировать и классифицировать объекты будет улучшаться, так что станет возможно обойтись без видеодисплея и подавать предупреждения водителю только относительно препятствий, находящихся на полосе движения или поблизости.

Без сомнения, наилучший способ подачи информации от систем ночного видения – трансляция на ветровое стекло, поскольку водитель может считывать информацию оттуда, не отрывая взгляд от дороги. Однако индикация на лобовом стекле не должна быть перегружена информацией, т.е. там не должно быть видеоизображений. Проекция предупредительного символа, специфического для той или иной дорожной ситуации, на ветровое стекло – это, вероятно, оптимальное решение.

Система диапазона NIR имеет то преимущество, что с ее помощью можно реализовать дополнительные функции помощи водителю на основе видеоинформации, а также обеспечения безопасности дорожного движения; не требуется устанавливать других устройств, чем те, которые уже используются в системе ночного видения. В будущем это позволить значительно снизить стоимость внедрения тех или иных функций.

Алфавитный указатель

A

AMR-датчики 1118

C

CAN с таймерным управлением 1075

G

G-нагнетатель 464
GMR-датчики 1120

M

MAG-сварка 306
MIG-сварка 306
MON 222
Motronic 535

N

N-канальные MOS-транзисторы 88
NDIR-анализатор 513

P

P-n переход, полупроводники 81
P-канальные MOS-транзисторы 88

R

RON 222

V

V-модель, мехатроника 1167
V-образный двигатель 418

W

W-образный двигатель 418

А

Абсолютная величина 106
Абсолютно черное тело 57
Абсорбционный (оптический) метод, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 516
Автобусы, автомобильные кузова 872
Автоматическая тормозная система 760
Автоматические коробки передач 672
Автоматические регуляторы, барабанный тормоз 805
Автоматические системы пуска двигателей 1000
Автоматический саморегулирующийся механизм, тормоз с плавающим суппортом 803
Автоматическое подавление помех в приемнике 1198
Автоматическое экстренное торможение 1220
Автомобилестроение, основные термины 314
Автомобильное изолирующее стекло 917
Автомобильное стекло с антенной 918
Автомобильное электрооборудование 948
Автомобильные ветровые и боковые стекла 914
Автомобильные краски 180
Агрегатное состояние 126
Адаптация системы управления с разомкнутым контуром 120
Адаптация с обратной связью, техника автоматического управления 121
Адаптация среднего значения количества топлива 615
Адаптивные блоки управления 120
Адаптивные гидравлические амортизаторы 708
Адаптивный круиз-контроль (ACC) 1214
Адресация, шинные системы 1068
Азотирование 192
Аквапланирование 330
Аккумуляторная батарея AGM 967
Аккумуляторные батареи, стойкие к глубокому разряду 967

Аккумуляторные батареи повышенной надежности 968
Аксиально-поршневые распределительные насосы высокого давления 630
Активная виброизоляция 43
Активная стабилизация рулевого управления на задней оси 847
Активная электромагнитная система шасси 704
Активные системы подвески 703
Акустика 46
Акустика автомобиля 360
Акустика замков 943
Акустические аэродинамические трубы 359
Акустический канал 1184
Акустическое остекление 918
Акустическое проектирование 362
Алгоритмы управления; система адаптивного круиз-контроля (ACC) 1216
Алмазоподобный углерод, DLC 206
Альтернативные виды топлив 228
Алюминий, кузов 861
Амортизаторы 706
Амплитуда, колебания 40
Амплитудная модуляция, трансляция радио- и телевизионного сигнала 1193
Амплитудный фактор, вибрации и колебания 42
Анодированные покрытия 207
Антенны 75
Антенны фактор 76
Антидетонационные свойства 222
Антипенная присадка, дизельное топливо 227
Антиферромагнитные материалы 137
Антифризы, охлаждающие жидкости 238
Антифрикционные покрытия, смазочные материалы 209
Анергия 58
Аппаратура для измерения концентраций токсичных веществ в отработавших газах 513
Арбитраж, FlexRay 1077
Арбитраж шины, CAN 1073
Архитектура E/E 1093
Архитектура системы, интегрированные системы управления динамикой 849
Архитектура электронных систем 1090, 1093
Асинхронный электродвигатель 975
Атмосферные условия 432
Аэроакустика 859
Аэродинамическая труба Эйфеля 355
Аэродинамические моменты 342
Аэродинамические параметры 354
Аэродинамические силы 342
Аэродинамические трубы для испытаний на моделях 358
Аэродинамические трубы для транспортных средств 355
Аэродинамические трубы с системами климат-контроля 359
Аэродинамическое сопротивление 325

Б

Базовая точка зажигания 571
Байпасное регулирование, турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами 473
Бамперы 862
Барабанные тормозные механизмы 804
Безнагрузочные потребители 951
Безопасность, легковые автомобили 864
Безопасность движения, связанная с факторами восприятия 864
Безопасность эксплуатации 865
Бесступенчатые коробки передач 678
Бесщеточные генераторы 993
Биения 41
Биксенон 892
Бингамовские тела 208
Биодизель, альтернативные виды топлив 230
Биоэтанол, альтернативные виды топлив 228
Биполярные транзисторы 84
Блестящее покрытие хрома 204
Ближнепольные условия 75
Ближний свет фар 879, 886
Ближний свет фар 884
Блок-схема 1030
Блокировочная муфта 668
Блокируемый замок 941

Блок обратного тока, генератор 989
Блок управления электропитанием 954
Блок цилиндров 409
Боковая подушка безопасности 933
Боковая сила 322
Боковая сила 354
Боковое ускорение 338
Боковые габаритные фонари 900
Болтовые соединения 284
Большая дальность, электронные системы кругового обзора 1204
Большой люк 1181
Борт обода 723
Бортовая диагностика 522
Бортовая сеть напряжением 14 В 949
Бортовая сеть с двумя аккумуляторными батареями 953
Бортовая сеть с одной аккумуляторной батареей 953
Быстросменный масляный фильтр 457

В

Вакуумная цементация 191
Ванкель 442
Варианты кузовов легких коммерческих автомобилей 869
Варианты расположения цилиндров 418
Варианты фар 889
Варикап 83
Ввод пункта назначения; навигация транспортного средства 1212
Ведущий-ведомый 1067
Векторная диаграмма, конденсатор 65
Вентиляторы 449
Версии системы Motronic 539
Вертикальные завихрения 382
Ветвь ремня 270
Ветровые стекла с защитным покрытием 917
Взрывная заклепка 310
Вибрационные напряжения резьбовых крепежных элементов 297
Вибродатчики 1126
Виброизоляция 43
Вибропоглотители 712
Виброустойчивые аккумуляторные батареи 967
Видеотехнология 1158
Визуальный канал 1184
Винтовой нагнетатель 464
Винтовые пружины 243
Влияние на подруливающие свойства через стабилизацию поперечной устойчивости 848
Внешний диаметр 261, 265
Внешняя безопасность, легковые автомобили 865
Внутреннее зацепление 261
Внутренние размеры, легковые автомобили 854
Внутренний шум 361
Водоотталкивающее остекление 918
Водород, альтернативные виды топлив 229
Возбуждение, вызываемое дорогой 685
Воздухозаборный модуль 460
Воздушное охлаждение 417, 446
Воздушные фильтры (воздухоочистители) 459
Волна, вибрации и колебания 41
Волновая зубчатая передача с гибким звеном 755
Волновод 74
Волновое сопротивление 74
Впрыск топлива во впускной трубопровод 377
Впускные трубопроводы с изменяемой геометрией 400
Вращательное движение, основные уравнения 34
Время, предшествующее торможению 331
Время активного торможения 763
Время отклика 331
Время первоначального срабатывания тормозов 763
Время переноса 331
Время полного торможения 764
Время распознавания опасности 331
Время реагирования, тормоза 763
Время торможения 332
Вспомогательная тормозная система 760

Вспомогательные пусковые устройства 66, 636
Вступление в силу, стандарт CARB 490
Вступление в силу, стандарт EPA 494
Второй закон Кирхгофа 63
Втулочная цепь 278
Выбросы двигателей с искровым зажиганием 384
Выбросы твердых частиц 390
Вынужденные колебания 41, 43
Выпрямительный диод 83
Выпрямление напряжения переменного тока, генератор 987
Выпускная заслонка, моторный тормоз 798
Высокоскоростная шина CAN 1072
Высота и частота звука 51
Вытеснительные насосы, электрические топливные насосы, 551
Вытеснительный нагнетатель 463
Выходная мощность двигателей с искровым зажиганием 385
Вычитающий усилитель 92
Вязкое течение 211
Вязкостная муфта 449
Вязкость, дизельное топливо 226
Вязкость 212
Вязкость сдвига 210
Вязкость тормозных жидкостей 236

Г

Габаритные фонари 900
Газовая цементация 191
Газовые датчики 1137
Газогенератор, подушка безопасности 935
Газообмен 392
Газоразрядные лампы 878
Газоразрядные лампы 878
Галогенная лампа с двойной нитью 879
Галогенные лампы 878
Галогенный наполнитель 878
Гальваническая связь 1018
Гальваническое напряжение 77
Гаситель колебаний 44
Гашение вибраций 43
Геливые смазки, смазочные материалы 209
Генератор с клювообразными полюсами 993
Генераторы на компактных диодах 993
Генераторы переменного тока 986
Геометрическая дальность фары 887
Гибридная технология BCD 88
Гибридные приводы 646
Гибридные топологии 1070
Гибридный привод 647
Гибридный привод с разделением мощности 653
Гидравлическая система экстренного торможения 842
Гидравлические телескопические амортизаторы 706
Гидравлический блок, ESP 834
Гидродинамические подшипники скольжения 246
Гидродинамический тормоз-замедлитель 799
Гидродинамическое трение 211
Гидрокрекинговые масла 209
Гидромеханические исполнительные механизмы 1007
Гидромуфты и гидротрансформаторы 667
Гидропневматическая подвеска 700
Гидропневматическая подвеска 704
Гидростатика 52
Гидростатический пресс 52
Гипоидная передача 260
Главная передача 679
Гликоли, тормозная жидкость 237
Глубина азотирования 192
Глубина закалки 188
Глубина науглероживания 191
Глубина химико-термического упрочнения поверхности 191
Глухая заклепка 310
Глушители поглотительного типа, система выпуска выхлопных газов 484
Глушители резонансного типа, система выпуска отработавших газов 483
Глушители системы выпуска отработавших газов 483

Глушители со спирально намотанной оболочкой, система выпуска отработавших газов 484
Головка блока цилиндров 411
Городские автобусы, автомобильные кузова 872
Гравиметрический метод, техника измерения концентраций составляющих отработавших газов 515
Гравитационная тормозная система 761
Градация вязкости моторных масел по SAE 216
Градиентные датчики 1123
Граница дросселирования турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами 470
Граница помпажа турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами 470
Граничная температура прокачивания, смазочные материалы 209
Графики пределов усталости для винтовых пружин сжатия 245
Графит, смазочные материалы 209
Графические модули в блоке приборов 1187
Греческий алфавит 107
Громкость в «сонах» 51
Группы материалов 135

Д

Давление истечения, смазочные материалы 208
Давление насыщенных паров, бензин 223
Дальний свет фар 884, 886
Дальность света фары 887
λ-датчик 103
Датчик аккумуляторной батареи 960
Датчик веса 1146
Датчик детонации 573
Датчик дождя 926
Датчики вихревых токов 1149
Датчики в салоне 935
Датчики высокого давления 1133
Датчики давления 1130
Датчики загрязнения фар 1152
Датчик измерения расстояния; система адаптивного круиз-контроля (ACC) 1214
Датчики концентрации 1137
Датчики массового расхода воздуха 1135
Датчики момента 1143
Датчики положения 1105
Датчики с закорачивающим кольцом 1106
Датчики силы 1143
Датчики скорости вращения вокруг вертикальной оси 1124
Датчики температуры 1140
Датчики ускорения 1126
Датчики Холла 1110
Датчики Холла для измерения угла поворота 1112
Датчики частоты вращения 1121
Датчик качества воздуха 1139
Датчик концентрации кислорода 103
Двигатели внутреннего сгорания 366
Двигатель VR-типа 418
Двигатель внутреннего сгорания 376
Двигатель переменного тока 71
Двигатель с искровым зажиганием 376
Двигатель с оппозитным расположением цилиндров 418
Двигатель с противоположно движущимися поршнями 418
Двигатель с радиальным расположением цилиндров 418
Движение заряда топлива 382
Двоичная система 104
Двухкомпонентные клеевые составы 309
Двухплунжерный радиально-поршневой насос 623
Двухплунжерный рядный поршневой насос 624
Двухпроводной кабель 1071
Двухрежимный гибридный привод 654
Двухступенчатое регулирование λ 590
Двухступенчатый регулируемый турбонаддув 476
Двухтактный цикл работы двигателя 393
Двухтрубные амортизаторы 707
Действительное контактное давление 266
Действительный шаг зубьев 262
Декремент, вибрации и колебания 41
Демпфер пульсаций давления топлива 558

Демпфирование, колебания 41
Демпфирование 240
Держатель замка 939
Десульфатация каталитического нейтрализатора NO_x 640
Десульфатация каталитического нейтрализатора NO_x аккумуляторного типа 587
Десятичная система счисления 104
Детектирование насыщения сажевого фильтра 645
Детектор Cutter FID 514
Детектор GC FID 514
Детергенты 208
Детонация 383
Детонация 585
Деформационное поведение кузова автомобиля, легковые автомобили 866
Децибел 46
Диагностика 520
Диагностика в мастерской 531
Диагностика герметичности топливной системы 527
Диагностика каталитического нейтрализатора 527
Диагностические функции ECU 533
Диагональные шины 732
Диаграмма момента зажигания 380
Диаграмма направленности 76
Диаграмма фаз газораспределения 414
Диамагнетики 137
Диамагнитные материалы 67
Диаметральный модуль 264
Диаметр делительной окружности 265
Диаметр окружности выступов 265
Диапазон рабочих температур свечей зажигания 582
Дизельное топливо 224
Дизельные распределительные топливные насосы высокого давления 630
Дизельные сажевые фильтры закрытого типа 642
Дизельный двигатель 386
Дизельный индекс 224
Дизельный сажевый фильтр с каталитическим покрытием 644
Дилатантное течение 211
Динамика автомобиля 324
Динамика коленчатого вала 420
Динамика поперечного движения 341
Динамика порогов слышимости 46
Динамика прямолинейного движения 324
Динамическая вязкость 53
Динамическая вязкость 53, 427
Динамические поворотные фары 894
Динамический выбор маршрута; навигация транспортного средства 1212
Динамический наддув 399
Динамическое шумоподавление для приемника 1197
Динамо-поле (DF) 952
Диод Зенера 83
Диод Шотки 83
Диоды 83
Дипольные антенны 75
Дипольный момент 60
Дисковые тормоза 802
Дискомфортный свет 887
Дискретные полупроводниковые приборы 83
Дисперсанты 208
Дисплей карты, навигация транспортного средства 1213
Дисплей на жидких кристаллах (LCD) 1188
Дистанция безопасности 333
Дисульфид молибдена 210
Дифференциал 680
Дифференциальное уравнение, колебательная система 42
Дифференциальные датчики Холла 1111
Диффузионные покрытия 207
Диэлектрик 60
Диэлектрическая постоянная 61
Длина волны 46
Дневные ходовые огни 902
Добротность, вибрации и колебания 41
Дозирующее устройство, система впрыска с общей топливной магистралью 622
Долговечность, стандарт CARB 491
Дополнительные кондиционирующие блоки 1171
Дополнительные лампы 885
Дополнительные функции поперечной динамики, ESP 830

Допускаемые отклонения линейных размеров зубчатых передач по стандарту DIN 263
Допустимое контактное давление 266
Допустимые нагрузки, шарикоподшипники 258
Допустимые напряжения кручения для винтовых пружин 245
Допустимые уровни подавления помех 1016
Доступ к шине, FlexRay 1076
Доступ к шине, LIN 1079
Дроссельная заслонка 543
Дроссельный узел 544
Дуговая сварка металлическим электродом в среде активного газа (MAG) 306
Дуговая сварка металлическим электродом в среде инертного газа (MIG) 306
Дымовое число, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 518
Дымомер, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 517
Дымомер оптического типа определение дымности выхлопа дизельных двигателей 516

Е

Европейские циклы испытаний, легковые автомобили/грузовые автомобиле малой грузоподъемности 506
Емкость, конденсаторы 62
Емкость, характеристика аккумуляторной батареи 965
Емкость 61

Ж

Жидкостное охлаждение 446
ЖК-дисплей 1188

З

Зависимая подвеска 716
Завихряющая заслонка, система прямого впрыска топлива 569
Заголовок, LIN 1080
Задержка зажигания 387
Задние отражатели 900
Задние противотуманные фонари 902
Зажигание 379
Зажимы 290
Зазор между электродами, свечи зажигания 583
Закалка 186
Закалка и отпуск 189
Заклепка с грибовидной головкой 310
Заклепка с плоской круглой головкой 310
Заклепка с потайной головкой 310
Заклепочный болт 310
Заклепочная гайка 310
Закон Ампера 73
Закон Кулона 60
Закон неприрывности 73
Закон Ома 63
Законы Кирхгофа 63
Законы термодинамики 58
Закон электромагнитной индукции 70
Закрепление объектов за их полосами движения, ACC 1216
Закрытие впускного клапана 393
Закрытие выпускного клапана 393
Замедление при торможении 764
Замена межколесного распределения момента вмешательством тормозной системы и системы управления двигателем 848
Запорный механизм 939
Запорный механизм с двумя стопорными собачками 941
Заряд, свинцовая аккумуляторная батарея, 100
Заряд, стартерная батарея 968
Заряд 60
Заряд смеси в цилиндре 542
Заряжаемый гибридный привод» 648
Заслонки отработавших газов 486
Защелкивающиеся соединения пластмассовых деталей 302
Защита от запирания 942
Защита от коррозии, кузов 862
Защита от коррозии, осаждения 203
Защита от коррозии, присадки к тормозным жидкостям 237

Защита от угона 941
Звездная топология 1068
Звездочки 280
Звук 46
Звуковое давление 46
Звукоизоляция 47
Звукопоглощение 47
Зенеровский пробой 82
Знаковая функция 106
Значение выпрямления, вибрации и колебания 42
Значения допустимых шумовых воздействий 49
Зола 208
Зубчатая передача стартера 264
Зубчатая цепь 279
Зубчато-ременные передачи 274
Зубчатые передачи 260
Зубчатый ремень 274

И

Идеальный цикл Карно 369
Идентификатор, LIN 1080
Идентификатор, электрические схемы 1033
Избыточный шум 49
Изготовление плоского стекла 914
Изменение состояния для идеального газа 59
Изменение фаз газораспределения 543
Изменяемая геометрия турбины, турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами 473
Измерение напряжения 63
Измерение непрозрачности, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 516
Измерение сопротивления поляризации 197
Измерение тока контактной коррозии 199
Измерение уровня шума 360
Измерение электрического тока 62
Измерения отраженного света, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 516
Измерительный усилитель 92
Изотермическая закалка на аустенит 188
Имитирование хода педали, электрогидравлический тормоз 782
Импедансная спектроскопия 197
Импульсная модуляция, радар 1155
Инвертирующий усилитель 91
Ингибиторы, смазочные материалы 209
Ингибиторы коррозии, бензин 224
Ингибиторы коррозии 202
Ингибиторы коррозии для дизельного топлива 227
Индекс вязкости 212
Индекс образования паровой пробки 223
Индикатор заряда 953
Индикация на ветровом стекле 1189
Индуктивность 72
Индуктивные системы зажигания 575
Индукционная пайка 308
Индукция 66
Индукция движения 71
Инерционная тормозная система 761
Инерционный наддув 399
Инженерная акустика 361
Инструменты разработки, E/E-архитектура 1098
Интеллектуальное регулирование генератора 990
Интенсивность звука 47
Интенсивность турбулентности 381
Интерфейс периферийных датчиков 5 (PSI5) 1083
Интерференция, вибрации и колебания 41
Информационная система автомобиля 533
Испарение воды 133
Испарение капель топлива 378
Испарение топлива 377
Испаряемость, бензин 222
Исполнительные механизмы 1002
Использование мощности генератора 956
Испытания в переходном режиме 352
Испытания в режиме малых колебаний 352
Испытания двигателей на токсичность 510
Испытания на выделение паров топлива, заправочный тест 519
Испытания на выделение паров топлива, испытания на выплескивание топлива 519

Испытания на выделение паров топлива, потери на испарение во время движения 519
Испытания на выделение паров топлива, потери на испарение во время заправки автомобиля топливом 519
Испытания на выделение паров топлива, потери на испарение из топливного бака 519
Испытания на выделение паров топлива 518
Испытания на коррозионную стойкость 197
Испытания на твердость 182
Испытания серийной продукции, нормы контроля токсичности отработавших газов 489
Испытательные циклы для большегрузных грузовых автомобилей 507
Испытательные циклы легковых автомобилей и грузовых автомобилей малой грузоподъемности, принятые в США 503, 504
Исследовательское октановое число 222
Источники помех 1014
Источники света 878
Источники узкополосных помех 1015
Источники широкополосных помех 1015

К

К.п.д. тепловых двигателей 367
Кабина водителя 871
Калибровка нулевой подачи топлива 615
Каналы обмена информацией 1184
Карбонитрирование 191
Каскадное управление 117
Каталитическая очистка отработавших газов 586
Каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа 587
Каталитический нейтрализатор NO_x аккумуляторного типа 639
Каталитический нейтрализатор окислительного типа 639
Категории токсичности отработавших газов, стандарт CARB 490
Категории токсичности отработавших газов, стандарт EPA 494
Катодное осаждение 205
Катушка зажигания 577
Квадратное уравнение 105
Керамика 135
Керамические материалы 168
Керамический монолитный блок каталитического нейтрализатора 482
Кинематика, подвеска колес 714
Кинематика привода коленчатого вала 419
Кинематическая вязкость 211
Кинематическая вязкость 53
Клапанный газораспределительный механизм 413
Клапан регулирования давления, система прямого впрыска топлива 557
Клапан регулирования подачи топлива, система прямого впрыска топлива 554
Классификация, автомобили 853
Классификация ACEA (CCMC), моторные масла 214
Классификация вязкости масел 212
Классификация моторных масел по API 215
Классификация трансмиссионных масел по API 217
Классификация шин 732
Классическая клепка 310
Классы прочности резьбовых деталей крепления 293
Клеевые соединения 309
Клинчинг 312
Клепка 310
КМОП-матрица 1161
Кодовое обозначение пластмасс 178
Код раздела, электрические схемы 1033
Коды и символы сертификации, осветительное оборудование 877
Колебания и вибрации 40
Колебательная скорость частицы 40, 46
Колебательные гирометры 1124
Коленчатый вал 408
Колеса, грузовые автомобили 728
Колеса 722
Кольцевая топология 1069
Кольцевые структуры шины MOST 1087

Комбинации параллельных пружин 241
Комбинации последовательных пружин 241
Комбинации приборов 1186
Комбинации пружин 241
Комбинированная система регулирования давления 614
Комбинированный наддув 477
Коммутация, двигатели постоянного тока 971
Коммутирующая обмотка, двигатели постоянного тока 972
Компактные генераторы 993
Компенсаторные пружины 701
Компенсирующая обмотка, двигатели постоянного тока 972
Комплексные системы турбонаддува 475
Комплексные числа 107
Композитные подшипники с металлической основой 253
Композиционные материалы 136
Компоненты электронной системы управления дроссельной заслонкой (ETC) 544
Компрессор турбонагнетателя, приводимого в действие отработавшими газами 470
Конверсионные покрытия 207
Конденсатор 61
Конденсаторы с пластинчатыми обкладками 62
Кондиционер 1170
Коническая зубчатая передача 260
Консистентость, смазочные материалы 209
Конструкции ободов, легковые автомобили 723
Конструкции радиаторов 446
Конструкции свечей зажигания 583
Конструкции тормозных систем легковых автомобилей 776
Конструкции цепей 278
Конструкция коленчатого вала 419
Конструкция кузова, легковые автомобили 856
Конструкция кулачков 415
Конструкция лампы-фары 887
Конструкция шины 732
Контактная коррозия 196
Контактная разность потенциалов 77
Контактная рельефная сварка 304
Контроллер Groundhook, амортизаторы 711
Контроллер Skyhook, амортизаторы 710
Контроллер поперечной динамики, ESP 827
Контроль баланса топлива, общая рампа 615
Контрольно-измерительные приборы 1185
Контрящие устройства резьбовых крепежных деталей 298
Контур хладагента, управление климатом 1173
Конусное соединение 289
Конфигурации установки каталитических нейтрализаторов 588
Корневой диаметр 261, 265
Короткозамкнутая клетка, асинхронный электродвигатель 975
Коррегирование зубчатого зацепления 261
Коррекция момента опережения зажигания 572
Коррекция разброса подачи топлива форсунками 615
Корреляционное определение по карте, навигация транспортного средства 1211
Коррозия, электрохимия 102
Коррозия 194
Коррозия вибрационными трещинами 196
Коррозия трещинами 196
Коррозия усталостными трещинами 196
Косинус 105
Косозубая коническая передача 260
Котангенс 105
Коэффициент аэродинамического сопротивления 327
Коэффициент аэродинамического сопротивления 857
Коэффициент гармоник, вибрации и колебания 42
Коэффициент демпфирования 340
Коэффициент демпфирования 711
Коэффициент звукопоглощения 47
Коэффициент избытка воздуха 559

Коэффициент отражения 74
Коэффициент Пелтье 78
Коэффициент повышения давления 372
Коэффициент полезного действия, генератор 992
Коэффициент преобразования топлива 374
Коэффициент профиля зуба 268
Коэффициент рассеивания 73
Коэффициент расширения струи, гидромеханика 54
Коэффициент расширения струи, гидромеханика 54
Коэффициент сжатия струи, гидромеханика 54
Коэффициент стоячей волны 74
Коэффициент теплового расширения 127
Коэффициент трения 38
Коэффициент усиления антенны 76
Коэффициент усиления рыскания 340
Коэффициенты теплопередачи 57
Краски 205
Крен 315
Кривая 67
Кривая Штрибека 211
Кривые намагничивания 69
Кривые размагничивания 68
Критические скорости при прохождении поворотов 343
Круговые шпоночные соединения 291
Крутящая сила 423
Ксеноновые фары 890
Кузов 860
Кузова транспортных средств (коммерческие автомобили) 868
Кузовные тонколистовые металлы 148
Курсовая устойчивость, система адаптивного круиз-контроля (ACC) 1215

Л

Лавинный пробой 82
Лазерная сварка 307
Ламинарный поток 53
Лампы накаливания 878
Легирование 80
Легкие сплавы 150
Лидар 1158
Ликвация 308
Линейная шина 1068
Линейные элементы, метод конечных элементов 109
Листовая сталь, кузов 861
Листовая сталь 155
Литий-ионная аккумуляторная батарея 102
Логарифмическая функция 104
Логарифмический декремент, вибрации и колебания 41
Логические состояния шины 1073
Люк-спойлер 1181
Люк с подъемно-сдвижной крышкой 1181
Люфт подшипника, подшипники качения 255
Лямбда-зонд 1138

М

Магнитная индукция 66
Магнитная поляризация 67
Магнитная проницаемость 127
Магнитная цепь 73
Магнитно-индуктивные датчики 1106
Магнитное поле 60, 66
Магнитные материалы 136, 154
Магнитные силовые линии 70
Магнитный дипольный момент 67
Магнитомягкие материалы 68, 137
Магнитомягкие ферриты 159
Магниторезистивные NiFe тонкопленочные датчики 1116
Магниторезистивные датчики 1115
Магнитостатические датчики 1109
Малая дальность; электронные системы кругового обзора 1204
Маневрирование автомобиля с ESP и без него 824
Маркировка шин 734
Масляный фильтр 406, 456
Масляный фильтр со сменным элементом 457
Математика 104
Математические знаки и символы 107

Материал решетчатых пластин, стартерная батарея 963
Материалы, используемые при изготовлении кузовов 861
Материалы 126
Материалы 135
Материалы для пайки 163
Материалы для постоянных магнитов 139, 160
Медные сплавы 149
Междугородные автобусы, автомобильные кузова 873
Межкристаллическая коррозия 196
Меры по минимизации вибрации 692
Места размещения аккумуляторной батареи 949
Металлические покрытия 181
Металлические пружины 241
Металлический монолитный блок каталитического нейтрализатора 482
Металлокерамика 135, 151, 158
Металлокерамические подшипники 253
Металлокерамические подшипники скольжения 251
Металлургические стандарты 139
Металлы 135
Метан, альтернативные виды топлив 229
Метанол, альтернативные виды топлив 228
Метилэфиры жирных кислот, альтернативные виды топлив 230
Методики динамических испытаний 348
Метод конечных элементов 108
Методология разработки, мехатроника 1165
Метод сканирования с использованием эталонного электрода 197
Методы доступа, объединение в сети 1067
Метрические резьбы 300
Механика, основные уравнения 34
Механика жидкостей и газов 53
Механические коробки передач 670
Механический к. п. д. 374
Механический полностью регулируемый клапанный механизм 397
Мехатроника 1164
Микроавтобусы, автомобильные кузова 872
Микрокомпьютер 96
Микроконтроллер 97
Микромеханика 1102
Микропроцессор 96
Минеральное масло, тормозная жидкость 237
Минеральное масло 209
Миниавтобусы, автомобильные кузова 872
Многоабонентская шина 1067
Многоконтурная тормозная система 761
Многослойное безопасное стекло с подогревом 917
Многоступенчатое цементирование 191
Многоступенчатые коробки передач 669
Многотопливные двигатели 391
Многочлены, математика 105
Модальный анализ 44
Модели, архитектура E/E 1093
Модификаторы трения 208
Модуль 265
Модуль подачи топлива 553
Модуляция FMCW, радар 1156
Момент зажигания 393
Момент зажигания 571
Момент поворота рулевого колеса 316
Моменты, воздействующие на крепежную деталь 294
Моменты затяжки стандартных болтов 297
Моменты инерции 36
Мониторинг в реальных условиях дорожного движения, стандарт CARB 492
Мониторинг в реальных условиях дорожного движения, стандарт EPA 494
Мониторинг в реальных условиях эксплуатации, нормы контроля токсичности отработавших газов 489
Мониторинг в реальных условиях эксплуатации, стандарт ЕС 498
Монолитные интегральные схемы 95
Монтаж колеса 722
Монтажная схема, электрические схемы 1036

Монтажная схема 1031
Монтажный мат каталитического нейтрализатора 482
Моторное октановое число 222
Моторные масла 213
Мощность, расходуемая на торможение 764
Мощность двигателя 432
Мощность звука 47
Моющие присадки, бензин 224
Моющие присадки, дизельное топливо 227
Мускульная система рулевого управления, определение 748
Мускульная тормозная система 761
Муфта свободного хода, стартер 1000
Мыльные смазки 209
Мягкая остановка, электрогидравлический тормоз 781
Мягкие припои 163
Мягкий отжиг 189

Н

Набухание эластомеров, тормозные жидкости 237
Навигационное счисление; навигация транспортного средства 1211
Нагнетатели, приводимые волновым давлением газа 465
Нагнетатели с механическим приводом 462
Нагнетатель Comprex 466
Нагнетатель Hyprex 467
Нагнетатель Ванкеля 465
Нагнетатель Рутса 463
Нагреватели воздуха, вспомогательная отопительная система 1176
Нагреватели охлаждающей жидкости дополнительной системы отопления 1177
Нагрузка на колесо 322
Наддув с использованием специально настроенных впускных каналов 399
Надежность передачи, шинные системы 1070
Назначение приоритетов 1073
Наполовину полая заклепка 311
Направление цикла 367
Направление электрического тока 62
Направленная цифровая антенна приемника 1197
Направляющая клапана 414
Направляющие цепных передач 281
Напряжение на свече зажигания 570
Напряжение постоянного тока 62
Напряжение пробоя 82
Напряжение смещения 93
Напряженность паразитного поля 1016
Напряженность электрического поля 60
Наружное зацепление 261
Насос-форсунки для коммерческих автомобилей 627
Насос высокого давления с непрерывной подачей топлива, система прямого впрыска топлива 555
Насосы высокого давления 621
Насосы высокого давления для систем прямого впрыска топлива 553
Натяжители цепи 281
Натяжитель диагональной ветви трехточечного ремня 929
Натяжительные направляющие, цепные передачи 281
Натяжитель пряжечного типа 930
Натяжные устройства ремней безопасности 928
Науглероживание 191
Начальный диаметр 265
Независимая многорычажная подвеска 720
Независимая подвеска с двойными поперечными рычагами 718
Независимая подвеска с диагональными рычагами 718
Независимая подвеска с продольными рычагами 718
Независимая подвеска с пружинными стойками 720
Независимая подвеска с трапециевидными рычагами 721
Независимая подвеска с управляющим ребром 721

Независимая пятирычажная подвеска 721
Независимые подвески 718
Неинвертирующий усилитель 91
Неисправности аккумуляторных батарей 969
Неконтролируемое сгорание топлива 383
Неметаллические материалы, свойства 167
Неметаллические углеродные покрытия 206
Немускульная тормозная система 761
Необслуживаемые аккумуляторные батареи 966
Неорганические материалы 135
Непрерывное регулирование λ 591
Неразъемные соединения, способы соединения деталей 304
Несущая поверхность 429
Низковольтная система предпускового подогрева 637
Низкотемпературные отложения, смазочные материалы 209
Низкотемпературный испытательнй ток, характеристика аккумуляторной батареи 965
Низкошумные конструкции 48
Никелевое гальванопокрытие 204
Никель-металлогидридная аккумуляторная батарея 101
Нитроцементация 192
Номинальная емкость, характеристика аккумуляторной батареи 965
Нормализация 190
Нормальная сила поршня 420
Нормативы на уровень громкости звука 50
Нормы контроля токсичности отработавших газов 488
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт CARB 490
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт EC 496
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт EPA 493
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт EU для большегрузных грузовых автомобилей 501
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт США для большегрузных грузовых автомобилей 499
Нормы токсичности отработавших газов, стандарт Японии для большегрузных грузовых автомобилей 502
Нормы токсичности отработавших газов, стандрат Японии 499
Ньютоновские жидкости 211

О

Обгон 333
Область контакта колеса 322
Область пространственного заряда 82
Обнаружение объектов, ACC 1216
Обнаружение опасности столкновения 937
Обод, грузовые автомобили 728
Обозначения выводов 1041
Оболочковые элементы, метод конечных элементов 109
Обработка бором 192
Образование капель топлива 378
Образование смеси, дизельные двигатели 386
Образование токсичных продуктов 384
Обслуживание аккумуляторных батарей 969
Общая безопасность, автомобильные кузова, легковые автомобили 867
Общий к.п.д. 374
Объединение автомобильных систем в сеть 1064
Объемные расходомеры 1135
Объемные элементы, метод конечных элементов 110
Объемная микромеханика 1102
Овальная заклепка с потайной головкой 310
Ограничитель усилия ремня 930
Одноколейная линейная модель 339
Однокомпонентные клеевые составы 309
Одноконтурная тормозная система 761
Одноплунжерный радиально-поршневой насос 623
Однопроводная тормозная система 761
Однопроводной кабель 1072

Однорежимный гибридный привод 653
Однотрубные амортизаторы 707
Окрашивание, кузов 862
Октавный спектр 47
Октановое число 222
Омическое сопротивление 63
Операции системы экстренного торможения 842
Операционные усилители 88
Операционный усилитель с отрицательной обратной связью 89
Операционный усилитель с положительной обратной связью 89
Описательный файл LIN 1081
Опознавание дорожных знаков 1223
Опознавательные огни 903
Определение дымности выхлопа дизельных двигателей 516
Определение мощности 433
Определение направления движения; навигация транспортного средства 1211
Определение периода протекания электрического тока 576
Определение столкновения, подушка безопасности 932
Определение твердости склероскопом 185
Оптические волокна (оптические волноводы) 1089
Оптоэлектронные датчики 1150
Органические материалы 136
Ориентация на передачу 1068
Ориентация на пользователя 1068
Осаждение олова 204
Осаждение погружением в горячий раствор 205
Осаждения 203
Осаждения золота 204
Осаждения цинка 203
Освещение в задней части автомобиля 876
Освещение в передней части автомобиля 876
Освещение в салоне автомобиля 876
Освещение для удобства 907
Освещение при плохой погоде 895
Оси с продольными рычагами 717
Ослабление вибрации 43
Основные размеры, легковые автомобили 854
Остаточная магнитная индукция 67
Остаточные отработавшие газы в цилиндре 542
Остекление автомобилей 915
Остекление люков триплексом 917
Остекление с тонировкой 916
Острота резонанса, вибрации и колебания 41
Ось поворота колес 317
Ось продольной качки 319
Отжиг 189
Открытая системная архитектура AUTOSAR 1098
Открытие впускного клапана 393
Открытие выпускного клапана 393
Относительная проницаемость 67
Отношение сигнал-шум, трансляция радио- и телевизионного сигнала 1194
Отопительный контур, управление климатом 1173
Отпуск 188
Отражатель 888
Отражатель индикации на ветровом стекле 1190
Отражатель типа HNS 889
Отрицательный полюс 62
Отслеживание по малым скоростям, ACC 1218
Охлаждающая жидкость 238
Охлаждающая жидкость 446
Охлаждение масла 451
Охлаждение отработавших газов 455
Охлаждение топлива 451
Оценка состояния движения, ESP 826
Очень малая дальность; электронные системы кругового обзора 1204
Очиститель тормозного диска 843
Очистка ветрового и заднего стекол и фар 920
Очистка отработавших газов, система выпуска отработавших газов 480

П

Пайка 308
Пайка беззазорных соединений 309
Пайка мягким припоем 308
Пайка открытым пламенем 308
Пайка паяльником 309
Пайка твердым припоем 308
Пайка твердым припоем V-образных соединений 309
Память данных; навигация транспортного средства 1213
Панорамные крыши 918
Панорамный люк 1181
Парабола 105
Паразитное излучение 1017
Параллельное подключение, индуктивность 72
Параллельное подключение, конденсаторы 62
Параллельное подключение, резисторы 64
Параллельный гибридный привод 649
Параллельный турбонаддув 475
Парамагнетики 137
Парамагнитные материалы 67
Парамагнитный детектор 514
Параметры бортовой сети 955
Парафиновое дизельное топливо 231
Паровая пробка 222
Пары качения 429
Пассивная безопасность, автомобильные кузова (грузовики) 874
Пассивная безопасность, легковые автомобили 865
Пассивная виброизоляция 44
Пассивная искра 578
Пенетрация 210
Пенетрация перемешанной смазки 213
Первичный тормоз-замедлитель 799
Первый закон Кирхгофа 63
Передаточная функция, вибрации и колебания 41
Передаточная функция, ускорение кузова 689
Передаточное отношение рулевого механизма 317
Передача информации, радио- и телевещание 1192
Передача маркера 1067
Передача мультимедийных данных, MOST 1086
Передача пакетных данных, MOST 1087
Передача силы, основные уравнения 34
Передача управляющих сообщений, MOST 1086
Передающее устройство, рабочая тормозная система, легковые автомобили 776
Передающее устройство, тормозные системы 760
Передние поворотные фары 903
Передняя подушка безопасности 931
Переключательный диод 83
Перекрытие клапанов 393
Переменная степень сжатия 410
Перемодуляция в приемнике 1197
Перепускная заслонка 473
Перепускные фильтры 458
Переформулированный бензин 221
Переходные режимы, методики динамических испытаний 350
Период 40
Петля гистерезиса 66, 67
ПЗС-матрица 1160
Пиропатрон, подушка безопасности 935
Питтинговая коррозия 196
Плавное торможение 762
Плавучесть 52
Пламенно-ионизационный детектор 514
Планарная технология 95
Планетарный механизм, рулевое управление 755
Пластинчатые листовые пружины 242
Пластичное течение 211
Пластичные смазки 218
Пластмассы, кузов 862
Пластмассы 136
Пластмассы 171
Плечо рычага отклоняющей силы 318
Плоский треугольник 106
Плотность, бензин 222
Плотность 126
Плотность магнитной энергии 67

Плотность смещения 60
Плотность электрической энергии 61
Плотность электромагнитной энергии 75
Пневматическая подвеска 698
Пневматическая система экстренного торможения 842
Пневмоподвеска с сильфонами 699
Побитовый арбитраж 1073
Поведение автомобиля, основные термины 314
Поведение в повороте 342
Поверхностная закалка 187
Поверхностная микромеханика 1103
Поверхностное давление, резьбовые крепежные детали 297
Поворотная защелка 939
Поглощение вибраций 44
Подавление помех 1014
Подавление раскачивания прицепа, ESP 831
Подача масла 416
Подача топлива, двигатель с искровым зажиганием 546
Подвеска, система выпуска отработавших газов 485
Подвеска 694
Подвеска колес 714
Подвеска с П-образной балкой 717
Подвеска с торсионной балкой 717
Подключение катушки индуктивности 73
Подушка безопасности 931
Подушка безопасности для защиты коленей 933
Подушка безопасности с уменьшенным поглощением энергии 932
Подшипники качения 255
Подшипники скольжения 246
Подшипники со скользящим контактом 252
Подъемная сила 354
Позитивные или геометрически замкнутые соединения 282
Поиск и устранении неисправностей 531
Показатель углеродистых отложений, дизельное топливо 226
Покрытия, получаемые воронением 207
Покрытия, получаемые фосфатированием 207
Покрытия 203
Покрытия DLC 206
Покрытия PVD и CVD 205
Покрытия из алмазоподобного углерода 206
Покрытия из твердого материала 206
Покрытия из фосфата марганца 207
Покрытия из фосфата цинка 207
Покрытия хромом 204
Полая заклепка 310
Поле CRC, шина CAN 1074
Поле «Ack», шина CAN 1074
Поле «арбитра» 1074
Полевое волновое сопротивление 75
Полевой транзистор обогащенного типа 86
Полевые MOS-транзисторы 86
Полевые транзисторы 86
Полевые транзисторы с управляющим p-n переходом 86
Полезная фаза, FlexRay 1078
Полезный поток 73
Полная высота зуба 264
Полная теплотворная способность, топливо 220
Полнопоточные фильтры 458
Полноприводный автомобиль 681
Полностью автоматические коробки передач 675
Полностью нагруженные системы подвески 702
Полностью необслуживаемые аккумуляторные батареи 966
Положение искры 583
Положительный полюс 62
Полуавтоматические коробки передач 673
Полудифференциальные датчики с закорачивающим кольцом 1107
Полунезависимая подвеска 718
Полупроводниковая технология, базовые принципы 80
Полупроводниковые запоминающие устройства 98
Полупроводниковые приборы 83
Полюс крена 319
Полюс поперечных перемещений 319
Полюс продольных перемещений 320

Поляризация 60
Поляризация насыщения 67
Помехи от сигналов большой мощности 1197
Помощь в удержании на полосе движения 1222
Помощь в экстренном торможении 1220
Понижение уровня сигнала в приемнике 1197
Поперечное смещение оси поворота колеса по центру колеса 318
Поперечный отклоняющий момент 423
Порошковые композиционные материалы 138
Поршень 404
Посадка цилиндрических деталей с натягом 286
Последовательно-параллельный гибридный привод 653
Последовательное подключение, индуктивность 72
Последовательное подключение, конденсаторы 62
Последовательное соединение, резисторы 64
Последовательный гибридный привод 652
Последовательный турбонаддув 475
Постоянный дроссель, моторный тормоз 798
Постоянный ток 62
Постпроцессор, метод конечных элементов 108
Потенциально чувствительные устройства 1017
Потенциометры 1105
Потенциометры со скользящими контактами 1105
Потери на гистерезис 67
Потери на испарение во время выдержки в горячем состоянии 518
Потери на перемагничивание 69
Потери на перемагничивание 69
Поток рассеивания 73
Поток электрического смещения 60
Правило правой руки 70
Предварительные натяги стандартных болтов 297
Предел обеднения смеси 559
Предел текучести 0,2 %, параметры вещества 126
Предел текучести 208
Предел фильтрации дизельного топлива 225
Предсказывающие системы предупреждения о столкновении 1220
Предсказывающие системы экстренного торможения 1220
Представление в обособленном виде, электрические схемы 1032
Предупреждение о сходе с полосы движения 1222
Преобразование биомассы в жидкость 232
Преобразование газа в жидкость 232
Преобразование угля в жидкость 232
Препроцессор, метод конечных элементов 108
Прессовая посадка 286
Привод, системы стеклоочистителей 920
Привод вспомогательных агрегатов 272
Приводная сила, тормоз 762
Привод распределительного вала 415
Привод с высоким крутящим моментом 274
Приводы Stretch Fit 273
Приводы задних стеклоочистителей, очистка лобового и заднего стекол 926
Приготовление рабочей смеси в двигателях с искровым зажиганием 377
Прикладной уровень MOST 1088
Принцип вращающихся токов 1110
Принципиальная схема 1030
Принцип рычага 34
Припой 308
Природные материалы 136
Присадки, бензин 224
Присадки, дизельное топливо 227
Присадки, охлаждающие жидкости 238
Присадки, повышающие смазывающую способность, дизельное топливо 227
Присадки, повышающие текучесть, дизельное топливо 227
Присадки, повышающие цетановое число, дизельное топливо 227
Присадки, смазочные материалы 208
Присадки, тормозные жидкости 237

Присоединение пластины, микромеханика 1104
Прием радио- и телесигнала 1192
Прием сигнала с нескольких направлений 1197
Проблемы с приемом сигнала, трансляция радио- и телевизионного сигнала 1193
Проведение по маршруту, навигация транспортного средства 1213
Проводимость 63
Проводимость 80
Проводимость электролитов 99
Программное обеспечение системы FEM, метод конечных элементов 108
Продольная сила 322
Продольные шпоночные соединения 291
Продольный отклоняющий момент 423
Производимый шум, измеренные величины 48
Производительность в реальном времени 97
Противотуманные фары 897
Противоугонные системы 946
Протокол CAN 1073
Протокол Ethernet 1082
Протокол LIN 1080
Профили зубчатых ремней 274
Профиль PK зубчатого ремня 273
Профильные соединения вала со ступицей 283
Профиль потока 382
Профиль шкива 273
Процедура CVS 511
Процесс APSM 1104
Процесс COD 233
Процесс DRIE 1102
Процесс зарядки конденсатора 65
Процесс разработки, E/E-архитектура 1097
Процесс разряда, конденсатор 66
Процесс сгорания в режиме контроля смеси 388
Процесс сгорания гомогенной смеси 380
Процесс сгорания топлива в дизельных двигателях 387
Процесс Фишера-Тропша 231
Процессы наддува 399
Процессы сгорания топлива в двигателях
Процессы термической обработки 186
Процессы цифровой модуляции, трансляция радио- и телевизионного сигнала 1193
Прочие компоненты 528
Прочность на разрыв 126
Пружины 240
Пружины кузова 694
Прямая линия 105
Прямозубая передача 260
Прямолинейное движение, основные уравнения 34
Психоакустика 364
Путь обгона 333
Пьезоэлектрическая форсунка, система впрыска с общей топливной магистралью 618
Пьезоэлектрические датчики 1128
Пьезоэлектрические исполнительные механизмы 1005

P

Работа двигателя на сжиженном нефтяном газе 592
Работа двигателя при наличии однородной смеси 563
Работа двигателя при послойном распределении смеси 564
Работа пружин 240
Работа тормозных сил 764
Рабочая тормозная система, легковые автомобили 776
Рабочая тормозная система 760
Рабочая характеристика турбокомпрессора, приводимого в действие отработавшими газами 470
Рабочие циклы двигателя 368
Рабочий цикл поршнего двигателя 376
Радар большой дальности 1157
Радар малой дальности 1157
Радарная технология 1154
Радиально-поршневые распределительные насосы 633
Радиальное сопротивление смятию 126
Радиальные шины 732
Радиопомехи, помехи при приеме радио- и телевизионного сигнала 1194

Радиоприемники 1196
Радиус плеча обкатки 318
Развал колес 317
Разделенный по осям параллельный гибридный привод 651
Разделительные элементы, система выпуска отработавших газов 485
Разделяемый диск 725
Размеры багажного отделения 854
Разработка блока управления 119
Разрушение цинка 196
Разряд, свинцовая аккумуляторная батарея 100
Разряд, стартерная батарея 968
Рамы, автомобильные кузова 870
Раннее распознавание наезда на столб 936
Рапсовое масло, альтернативные виды топлив 231
Распознавание состояния аккумуляторной батареи 959
Распределение крутящего момента в продольном направлении у автомобилей с приводом на четыре колеса 847
Распределение крутящего момента колес в поперечном направлении 848
Распределение тормозных сил 763
Распределительный топливный насос с поворотным электромагнитным исполнительным механизмом 631
Распространение волн 74, 75
Распространение звука 46
Распространение пламени 380
Распространение струи топлива в дизельных двигателях 386
Рассеиватель, фары 888
Расслоение смазки 208
Расходомеры 1134
Расходомеры в виде трубок Пито 1135
Расход топлива, стандарт EPA 494
Расхождение управляемых колес 317
Расчет наибольшего допустимого давления, зубчатые передачи 265
Расчет маршрута, навигация транспортного средства 1212
Расширенное определение опрокидывания 936
Расширительный бачок 448
Реальные циклы 373
Ребристый клиновой ремень 271
Реверсируемые приводы, очистка ветрового и заднего стекол 922
Регенерация сажевых фильтров 643
Регламенты SFTP 505
Регулирование λ 590
Регулирование давления наддува, турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами 473
Регулирование напряжения, генератор 989
Регулирование напряжения в бортовой сети 952
Регулирование на стороне высокого давления 614
Регулирование подачи топлива на стороне всасывания 614
Регулирование распределительного вала 395
Регулирование фаз газораспределения 394
Регулировка света фар 908
Регулировка точки крепления пружины подвески 704
Регулируемые амортизаторы 708
Регулируемый насос высокого давления, системы прямого впрыска топлива (бензина) 553
Регулирующие контуры системы управления тяговым усилием (TCS) 818
Регулятор давления топлива 558
Редуктор, стартер 998
Реечный рулевой механизм 750
Резонанс, вибрации и колебания 41
Резонансная частота, вибрации и колебания 41
Резонатор $\lambda/4$, система выпуска отработавших газов 486
Резонатор Гельмгольца, система выпуска отработавших газов 486
Резьбовые крепежные детали 292
Рекомендуемое усилие на рулевом колесе в зависимости от динамики 846
Рекристаллизационный отжиг 189
Рекуперативная система торможения 657
Рекуперативное торможение 647
Ременные передачи 270
Ремни безопасности 928
Реологические системы
амортизаторов 709

Реология 210
Реопексные материалы 211
Рециркуляция отработавших газов (EGR) 403
Рисунок протектора 737
Роликовая (шовная) сварка 305
Роликовая цепь 278
Роторные приводы, очистка ветрового и заднего стекол 921
Роторный двигатель Ванкеля 442
Ротор с клювообразными полюсами, генераторы 987
Рулевое управление 748
Рулевое управление с наложением угла поворота рулевого колеса 754
Рулевое управление с усилителем для грузовых автомобилей 757
Рулевое управление с усилителем для легковых автомобилей 751
Рулевой механизм типа «винт-шариковая гайка-сектор» 750
Рулевые механизмы 750
Рыскание 315
Рычаги стеклоочистителей, очистка ветрового и заднего стекол 923
Рычажный стеклоподъемник 1180
Рядный двигатель 418
Ряд термоэлектрических констант 77
Ряды Фурье 41

С

Сажевые фильтры открытого типа 643
Самоблокирующийся полевой MOS-транзистор 87
Самовоспламенение 384
Самовоспламенение смеси 585
Самоиндукция 71
Сварка 304
Сварка в среде защитного газа плавящимся прутковым электродом 306
Сварка в среде инертного газа вольфрамовым электродом 306
Сварка в среде инертного газа плавящимся прутковым электродом 306
Сварка лазерным лучом 307
Свежая топливовоздушная смесь, заряд топлива в цилиндре 542
Светодиод 878
Светодиодная фара ближнего света 896
Светодиодные фары 896
Светодиоды 878
Светосигнальные лампы 899
Светочувствительные элементы 1151
Свеча зажигания 581
Свеча накаливания 636
Свеча накаливания Duraterm с нагревательным элементом в оболочке 637
Свеча с искровым промежутком 584
Свеча с поверхностным искровым промежутком 584
Свинцовая аккумуляторная батарея 100
Свинцово-кальциево-оловянные сплавы, стартерная батарея 964
Свинцово-кальциевые сплавы с добавлением серебра, стартерная батарея 964
Свинцово-кальциевый сплав, стартерная батарея 964
Свинцово-сурьмяный сплав, стартерная батарея 963
Сгорание предварительно смешанного топлива 387
Сгорание частично гомогенных смесей 382
Седло клапана 414
Селективное каталитическое восстановление окислов азота 640
Сервоклапан пьезоэлектрической форсунки 619
Сетевой слой 1066
Сжатый природный газ, альтернативные виды топлив 229
Сжиженный нефтяной газ, альтернативные виды топлив 229
Сжимаемость тормозных жидкостей 236
Сила на шатуне 420
Сила света 904
Сила тяги 328
Сила управления, тормоз 762
Силиконовые жидкости, тормозная жидкость 237
Силовая проводка дверей 942

Силы, воздействующие на крепежную деталь 294
Силы, действующие на автомобиль при движении под уклон 327
Сильный гибридный привод» 648
«Сильный» параллельный гибридный привод 650
Символы электрических схем 1022
Симплексный барабанный тормоз 804
Синтез информации от датчиков 1205
Синтетическое масло 211
Синус 105
Синусоидальное воздействие со стороны рулевого управления 351
Синхронизация, FlexRay 1077
Синхронизация, LIN 1080
Синхронный электродвигатель 977
Система DI-Motronic 539
Система ME-Motronic 539
Система SCR 642
Система SHARX приемника 1198
Система аварийной сигнализации 899
Система аварийной сигнализации и указателей поворотов 900
Система адаптивного круиз-контроля «ACC plus» 1218
Система без возврата топлива 546
Система бортовой диагностики, запись ошибок/неисправностей 521
Система бортовой диагностики, коды готовности 526
Система бортовой диагностики, мониторинг 520
Система бортовой диагностики, обнаружение ошибок/неисправностей 521
Система бортовой диагностики, обработка ошибок/неисправностей 521
Система бортовой диагностики, функции в аварийном режиме 521
Система бортовой диагностики 521
Система впрыска топлива Common Rail 612
Система выпуска отработавших газов 480
Система глобального позиционирования (GPS) 1210
Система динамической стабилизации (ESP) 822
Система динамической стабилизации для грузовых автомобилей 837
Система индивидуальных ТНВД 628
Система контроля давления в шинах 746
Система контроля детонации 573
Система насос-форсунок для легковых автомобилей 626
Система непрерывной подачи топлива 548
Система охлаждения двигателя 446
Система передачи, LIN 1079
Система передачи данных по радио для трансляции радио- и телепередач 1197
Система пневмоподвески 704
Система подачи без возврата топлива с регулированием по потребности 546
Система подачи дополнительных порций воздуха 589
Система помощи при трогании с места, электрогидравлический тормоз 781
Система принудительной смазки двигателя 456
Система разбавления отработавших Bag Mini Diluter 512
Система регулирования λ с двумя кислородными датчиками 591
Система регулирования λ с использованием трех кислородных датчиков 591
Система рециркуляции отработавших газов высокого давления 403
Система рециркуляции отработавших газов низкого давления 403
Система рулевого управления с усилителем, определение 748
Система рычагов, очистка ветрового и заднего стекол 922
Система сдвоенных фар 879
Система смазки двигателя 456
Система с направлением струи топлива в поток завихрения воздуха 565
Система с направлением струи топлива на днище поршня 564
Система с прямым направлением струи топлива 565
Система с торможением двигателем 798

Систематизация транспортных средств 852
Система трехфазного тока 982
Система улавливания паров топлива 549
Система управления двигателем с искровым зажиганием (SI) 534
Система управления климатом 1170
Система управления тяговым усилием, ACC 1216
Система управления тяговым усилием 818
Система цифровой диверсификации приемника 1198
Системы адаптивного заднего освещения 906
Системы безопасности водителя и пассажиров 928
Системы ближней инфракрасной области спектра 1225
Системы бортовой диагностики, пределы OBD 524
Системы выпуска отработавших газов коммерческих автомобилей 487
Системы дальней инфракрасной области спектра 1224
Системы зажигания 575
Системы замков 938
Системы защиты при опрокидывании автомобиля 934
Системы комфорта и удобства эсплуатации в районе дверей и крыши 1180
Системы люков в крыше 1181
Системы натяжения ремней 273, 276
Системы ночного видения 1224
Системы омывателей ветрового и заднего стекол 927
Системы очистителей ветрового стекла 920
Системы повышения безопасности дорожного движения 1202
Системы повышения безопасности на основе видео 1222
Системы подачи топлива с впрыском во впускной трубопровод 546
Системы подачи топлива с прямым впрыском топлива 547
Системы предпускового подогрева 636
Системы привода дверей 944
Системы прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей 378, 563
Системы прямого впрыска топлива для бензиновых двигателей 557
Системы пуска двигателей 996
Системы регулирования и управления без обратной связи 116
Системы рулевого управления, определения 748
Системы рулевого управления с гидравлическим усилителем 751
Системы рулевого управления с гидравлическим усилителем 751
Системы рулевого управления с электроусилителем 753
Системы стеклоомывателей фар 927
Системы стеклоочистителей заднего стекла 926
Системы управления гибридными приводами 654
Системы управления двигателями с искровым зажиганием 534
Системы управления электроэнергией 957
Системы фар 882
Системы чисел 104
Системы шасси 684
Склейка металлов 309
Скорость звука 47
Скорость нарастания выходного напряжения, операционные усилители 94
Слабый гибридный привод» 648
«Слабый» параллельный гибридный привод 650
Слоистые материалы 170
Смазочные масла 217
Смазочные материалы, работающие в условиях высоких давлений 209
Смазочные материалы 208
Смазывающая способность, дизельное топливо 226
Смешанное трение 211
Смещение оси поворота колеса 318
Смещение оси поворота по центру колеса 318
CMOS-транзисторы 88
Смягчение вторичного столкновения 936

Снижение содержания токсичных продуктов в выбросах дизельных двигателей 389
Снижение уровня шума 48
Снятие напряжений при отжиге 189
Собственная частота 41
Собственная электропроводность, полупроводники 81
Собственные колебания 43
Согласующие трансформаторы 75
Согласующий резистор 74
Содержание серы в топливе 220
Соединение заклепками в штампе 311
Соединение звездой, генератор 989
Соединение колебательных систем, вибрации и колебания 41
Соединение методом принудительной деформации 312
Соединения с зажимным конусом 289
Соединители 75
Соединительные элементы, система выпуска отработавших газов 485
Создание вращающегося поля, система трехфазного тока 982
Солнечный элемент 83
Соотношение воздух/топливо 559
Сопротивление 63
Сопротивление движению 324
Сопротивление качению 324
Сопротивление опрокидыванию 345
Сопротивление питтингу 266
Сопротивление потерь 74
Сопротивление теплопроницаемости 57
Сохраняемость, смазочные материалы 209
Спектр звука 47
Специальные динамические характеристики грузовых автомобилей 344
Спиральные пружины 242
Спиральный нагнетатель 464
Сплавы 135
Сплошная заклепка 311
Сплошная поверхностная коррозия 196
Способность автомобиля к восстановлению прямолинейного движения 344
Средние автобусы, автомобильные кузова 872
Средние значения, стандарт CARB 491
Средние значения норм токсичности, стандарт EPA 494
Средняя дальность, электронные системы кругового обзора 1204
Срез высоких частот в приемнике 1198
Срок службы зубчатой передачи 267
Стабилизаторы окисления, бензин 224
Стабилизаторы поперечной устойчивости 700
Стабилизирующий крутящий момент 322
Стандарт CARB 489
Стандарт EC 495
Стандарт EPA 493
Стандарт MOST 150 1085
Стандарт MOST 25 1085
Стандарт MOST 50 1085
Стандарт ЕС, нормы контроля токсичности выхлопных газов для большегрузных грузовых автомобилей 501
Стандарт США, нормы контроля токсичности отработавших газов для большегрузных грузовых автомобилей 499
Стандарты EN по металлургии 139
Стандарты зубчатых передач США 264
Стандарты качества топлива, дизельное топливо 224
Стандарт Японии, нормы контроля токсичности отработавших газов для большегрузных грузовых автомобилей 502
Стандарт Японии 498
Старение 190
Стартер 996
Стартерные приводы, стартер 998
Стартер с приводом предварительного зацепления 999
Стартеры с инерционным приводом 1000
Стартеры со скользящей шестерней 999
Статическое трение 38

Статичные фары для освещения поворотов 893
Стекла LSG 915
Стекла TSG 915
Стекла с покрытием 916
Стеклоподъемник с тросиком 1180
Стенд с беговыми барабанами, испытания двигателей на токсичность 510
Стоп-сигналы 901
Стопорная собачка 939
Стояночная тормозная система 760
Стояночные фонари 901
Стоячие волны, вибрации и колебания 42
Стратегия управления гибридным автомобилем 655
Структура MOST 1086
Ступенчатое воздействие 350
Стыковая сварка плавлением 305
Суммарный уровень звука 49
Сухое трение 211
Сухое фрикционное сцепление 666
Схема выводов, электрические схемы 1034
Схема с упорным и плавающим подшипниками, подшипники качения 257
Схема установки подшипников с предварительным натягом, подшипники качения 257
Схемы бортовой сети 953
Схемы двухконтурных тормозных приводов 774
Схемы трансмиссий 665
Схождение управляемых колес 317
Сцепление шины с дорогой 329
Сцепление шины с дорогой 739

Т

Тактильный канал 1185
Тангенс 105
Тарельчатые пружины 242
Тахограф 1200
Твердо-хромовое осаждение 204
Твердость, по Бринеллю 183
Твердость 182
Твердость по Кнупу 184
Твердость по Мартенсу 185
Твердость по отпечатку шариком 185
Твердые припои для обычной и высокотемпературной пайки 164
Твердость по Виккерсу 184
Твердость по Роквеллу 182
Твердость по Шору 184
Температура Ac1 188
Температура кипения тормозной жидкости 236
Температура Кюри 127
Температура образования льдинок, охлаждающая жидкость 238
Температура перегонки, бензин 222
Температура помутнения 208
Температурный диапазон изменения фракционного состава, дизельное топливо 225
Температурный коэффициент коэрцитивной силы магнитного поля 127
Температурный коэффициент магнитной поляризации 127
Теорема Пифагора 106
Теорема синусов 106
Тепловое излучение 56
Тепловой баланс 453
Тепловые двигатели 366
Теплопередача 56
Теплопередача 56
Теплопроводность 127
Теплопроводность 56
Теплота сгорания топливовоздушной смеси, топливо 220
Теплотворная способность, топливо 220
Термическая обработка металлов 182
Термо-ЭДС 77
Термодинамика 56
Термомагнитный эффект 78
Термопара 77
Термопластические эластомеры 177
Термопластмассы 136, 171
Термореактивные пластмассы 136, 174
Термостат системы охлаждения двигателя 447
Термостат с электронной системой управления, система охлаждения двигателя 448
Термоэлектричество 77

Техника автоматического управления, передаточные элементы 117
Техника измерения концентраций составляющих отработавших газов 510
Технология «искусственной головы», акустическое проектирование 364
Технология измерений, подсчет количества твердых частиц 515
Технология измерения содержания твердых частиц в отработавших газах 515
Технология измерения содержания твердых частиц в отработавших газах с использованием фильтров твердых частиц 515
Технология модульного охлаждения 452
Технология определения дальности 1163
Технология систем охлаждения 453
Тиксотропные материалы 211
Типовые испытания на соответствие техническим условиям, нормы контроля токсичности отработавших газов 489
Типовые испытания на соответствие техническим условиям, стандарт ЕС 496
Типы аэродинамических труб 355
Типы кривошипно-шатунных механизмов 418
Типы пружин 697
«Токс-клинчинг» 312
Токсичные выбросы 376
Толщина зуба на основной окружности 262
Топливная рампа 557
Топливная рампа 625
Топливная форсунка, образование струи топлива 566
Топливная форсунка для систем с впрыском топлива во впускной трубопровод 565
Топливные стандарты, бензин 221
Топливные форсунки с конусной формой распыления 566
Топливные элементы 658
Топливный фильтр, двигатель с искровым зажиганием 550
Топливо 220
Топливо для двигателей с искровым зажиганием 221
Топливо на основе метилэфиров жирных кислот FAME, альтернативные виды топлив 230
Топология, Ethernet 1082
Топология сети 1068
Топология тиап «цепочка» 1069
Торможение вихревыми токами 800
Торможение после аварии 1221
Тормоз-замедлитель 798
Тормозная сила 763
Тормозная система непрерывного действия 762
Тормозное оборудование 760
Тормозной коэффициент 763
Тормозной механизм 761
Тормозной момент 763
Тормозной путь 764
Тормозные жидкости 236
Тормозные системы, конструкция и организация 774
Тормозные системы, определения и принципы работы 760
Тормозные системы, требования 765
Тормоз с плавающим суппортом 802
Торсионные пружины 242
Торсионные стержни 243
Точечная сварка 304
Точка Н 854
Точка возгорания паров смазки, смазочные материалы 208
Точка воспламенения, дизельное топливо 226
Точка воспламенения, смазочные материалы 208
Точка застывания 210
Точка каплепадения 211
Точка остаточной магнитной индукции 67
Точки разрыва, электрические схемы 1033
Транзисторы 84
Транскристаллическая коррозия 197
Трансмиссионные масла 216
Трансмиссия 664
Транспортная служба видеоинформационной связи 1199
Транспортные средства 852
Транспортный слой 1066
Трансформатор 71
Требования к габаритной ширине грузовых автомобилей 345
Требования к системам OBD большегрузных грузовых автомобилей 529

Трейлер, FlexRay 1078
Трение 37
Трение каната 37
Трение скольжения 38
Третьоктавный спектр 47
Трехкомпонентный каталитический нейтрализатор отработавших газов 586
Трехплунжерный радиально-поршневой насос 621
Трибология 427
Тригонометрические функции 105
Трубчатая заклепка 310
Турбина турбонагнетателя, приводимого в действие отработавшими газами 471
Турбодвигатели 372
Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами 469
Турбокомпрессоры 467
Турбокомпрессоры и нагнетатели для ДВС 462
Турбонаддув с использованием отработавших газов 401
Турбулентная кинетическая энергия 381
Турбулентность 381
Турбулентный поток 53
Турбулентный поток 53
Туристические автобусы, автомобильные кузова 873
Тягово-скоростная характеристика автомобиля 665
Тяговое реле, стартер 998

У

Углеграфитные подшипники 253
Углеродные покрытия, содержащие металлический карбид 206
Угловая частота 40
Углы геометрической видимости 888
Угол дрейфа 315
Угол поворота колес 316
Угол поворота рулевого колеса 316
Угол поворота управляемых колес 316
Угол продольного наклона оси поворота колеса 318
Угол развала колес 317
Угол схождения 316
Угол увода 322
Угол установки поворотного шкворня 318
Удаленная сварка 307
Удельная теплота парообразования 127
Удельная теплота плавления 127
Удельная теплоемкость 127
Удельное акустическое сопротивление 47
Узкополосные антенны 75
Узкополосный спектр 47
Указатели поворотов 899
Ультразвук 46
Ультразвуковая технология 1154
Ультразвуковой датчик 1154
Уменьшение риска опрокидывания, ESP 838
Универсальная аккумуляторная батарея 954
Универсальные масла с высокими смазывающими свойствами 216
Унифицированный кузов 860
Управление временем, шинные системы 1067
Управление демпфированием 710
Управление колесами при движении накатом, ESP 827
Управление нагрузкой двигателей с искровым зажиганием 385
Управление работой двигателя при круиз-контроле, TCS 820
Управление работой дизельного двигателя 602
Управление с обратной связью 116
Управляющее устройство, рабочая тормозная система, легковые автомобили 776
Управляющее устройство, тормозные системы 760
Уравнение Айтелвейна 270
Уравнение Бернулли 54
Уравнение неразрывности 54
Уравнение Нернста 100
Уравновешивание масс в многоцилиндровых двигателях 422
Уравновешивание масс в одноцилиндровом двигателе 421
Уровень громкости 50

Уровень звука 49
Уровень звукового давления 48
Уровень звуковой экспозиции 50
Уровень мощности звука 48
Уровень шума, операционные усилители 94
Уровни напряжения, CAN 1072
Усиливающие нагреватели, вспомогательная отопительная система 1178
Усилия, действующие на шкив 270
Ускорение 328
Условие Аккермана 749
Условное обозначение свечей зажигания 584
Успокоитель вибраций коленчатого вала 417
Установившаяся температура кипения, тормозные жидкости 236
Установившееся замедление, тормоза 764
Установившееся криволинейное движение 349
Устройства, задающие акустические параметры глушителей, система выпуска отработавших газов 486
Устройства регулировки фар 910
Устройство, ограничивающее усилие, электропривод стеклоподъемника 1181
Устройство для регулировки автомобильных фар 887
Уточненная долговечность подшипников качения 259

Ф

Фаза холодного пуска, дизельные двигатели 389
Фактор эффективности цикла 374
Фара Bi-Litronic 892
Фара Litronic 891
Фары PES 890
Фары для визуальной регулировки 887
Фары с отражателями типа HNS 889
Ферромагнетики 137
Ферромагнитные материалы 67, 68
Физический слой 1066
Физическое парофазное осаждение, PVD 205
Фильтрационный метод, определение дымности выхлопа дизельных двигателей 517
Фильтрация воздуха 459
Флюс 308
Фон 50
Фонари на основе линз Френеля 904
Фонари на основе рефлекторной оптики 904
Фонари с оптоволоконной технологией 906
Фонари со светодиодами 905
Фонарь заднего хода 902
Форсунка высокого давления для систем прямого впрыска топлива 567
Форсунка с угловым отклонением струи топлива 567
Форсунка с электромагнитным клапаном, система впрыска с общей топливной магистралью 616
Форсунки, система впрыска с общей топливной магистралью 616
Фотодиод 84
Фоторезисторы 1151
Фотосчитывание 1159
Фототранзисторы 1152
Фракционный состав, бензин 223
Фрейм данных, Ethernet 1083
Фрейм данных, LIN 1080
Фрикционная система рулевого управления, определение 748
Фрикционное сцепление, работающее в масле 667
Фрикционные ременные передачи 270
Фрикционные соединения 286
Функции, математика 104
Функции AFS 895
Функции двойного запирания 941
Функции основного освещения, США 885
Функции остекления 916
Функции систем бортовой диагностики 526
Функциональный блок, MOST 1088
Функция захвата 97
Функция квадратного корня 106

Функция осушения тормозов, электрогидравлический тормоз 781
Функция помощи в «пробках», электрогидравлический тормоз 781
Функция сравнения 97

Х

Характеристика направленности антенны 75
Характеристики, дизельное топливо 224
Характеристики аккумуляторных батарей 965
Характеристики генератора 990
Характеристики демпфирования 709
Характеристики пружин 240
Характеристики рулевого управления с усилителем 752
Характеристики собственных колебаний 44
Характеристики управляемости 346
Характерные аэроакустические параметры 859
Хемилюминесцентный детектор 514
Химико-термическая обработка 191
Химико-термическое упрочнение поверхности 191
Химическая медь 205
Химические элементы 122
Химический никель 205
Химическое олово 205
Химическое осаждение 204
Химическое парофазное осаждение, CVD 205

Ц

Цветные металлы 149
Цвет фонаря, автомобильные лампы и фонари 903
Центральная плоскость автомобиля 315
Центробежный нагнетатель с механическим приводом 462
Центробежный насос, электроприводные топливные насосы 552
Цепные передачи 278
Цепь к.п.д 374
Цетановое число 224
Цикл Зейлигера с ограничением давления 372
Циклические колебания давления 383
Циклоидальное зацепление 261
Цикл при постоянном давлении 371
Цикл при постоянном объеме 370
Циклы испытаний, нормы контроля токсичности отработавших газов 489
Цинк-ламельное осаждение 205
Цифровая карта; навигация транспортного средства 1213
Цифровой тахограф 1200

Ч

Частично нагруженные системы подвески 702
Частота 40, 46
Частотная модуляция, трансляция радио- и телевизионного сигнала 1193
Червячная передача 260
Четырехпроводное измерение сопротивления 65
Четырехтактный рабочий цикл двигателя 392
Числовой модальный анализ 45
Число Зоммерфельда 247
Число Рейнольдса 53

Ш

Шаровидный цементит 190
Шасси, автомобильные кузова 870
Шестнадцатиричная система счисления 104
Шина CAN (локальная сеть контроллеров) 1071
Шина FlexRay 1075
Шина LIN 1079
Шина MOST 1085
Шина типа CT с плоской беговой дорожкой 733
Шинная топология 1068

Шины, конструктивные элементы подвески 694
Шины 732
Ширина резонансного пика половинной энергии, вибрации и колебания 41
Широкополосные антенны 75
Шифрование, CAN 1071
Шовная сварка встык 306
Шпоночные соединения 291
Шпоночные соединения с призматическими шпонками 282
Шпоночные соединения с сегментными шпонками 282
Штампованные, прокатные, литые металлы 135
Штифтовые соединения 284
Шумопоглощение, система выпуска отработавших газов 481
Шум от неподвижных автомобилей 361

Щ

Щетки стеклоочистителей 925

Э

Эвольвентная зубчатая передача 260
Эвольвентное зацепление 260
Эвольвентные шлицы 260
Эксергия 58
Экспериментальный модальный анализ 45
Экспоненциальная функция 104
Эластокинематика, подвеска колес 714
Эластомерные крепления 694
Эластомеры 136, 176
Электрическая регулировка сидений 1182
Электрическая система запирания дверей 944
Электрические двигатели 970
Электрические схемы 1029
Электрические цепи постоянного тока 64
Электрический потенциал 60
Электрическое поле 60
Электрогидравлические системы регулирования фаз газораспределения 398
Электрогидравлический тормоз 780
Электродвигатель параллельного возбуждения 973
Электродвигатель с внешним ротором 975
Электродвигатель с внутренним ротором 975
Электродвигатель с последовательным возбуждением 974
Электродинамические исполнительные механизмы 1004
Электродинамический принцип, исполнительные механизмы 1002
Электродинамический тормоз-замедлитель 800
Электроды 379
Электроконтактная сварка 304
Электролиз 99
Электролитические осаждения 203
Электромагнитные исполнительные механизмы 1003
Электромагнитные поля 60
Электромагнитный принцип, исполнительные механизмы 1002
Электромеханический клапанный механизм 397
Электромеханический стояночный тормоз 844
Электронагреватель, управление климатом 1171
Электроника 80
Электронная тормозная система 760
Электронно-коммутирующие двигатели 981
Электропневматические системы управления фазами работы клапанов 398
Электроприводные топливные насосы 551
Электропривод стеклоподъемника 1180
Электроприводы люков 1181
Электросопротивление 166
Электростатический разряд 1019
Электротехника 60
Электрохимические ряды металлов 99
Электрохимический шум 198
Электрохимия 99
Электрохромное остекление 918

Элемент щетки стеклоочистителя 925
Элементы направления цепей 281
Энергия 58
Энергоснабжающее устройство, тормозные системы 760
Энтальпия (теплосодержание) 56
Энтропия 58
Эталонная модель OSI 1065
Этиленгликоль, охлаждающие жидкости 238
Эффект глубокого проплавления 307
Эффект Допплера 47
Эффект Зеебека 77
Эффективное значение, периодический сигнал 42
Эффективность двигателей с искровым зажиганием 385
Эффективность фары 888
Эффективный световой поток 888
Эффект Пелтье 77
Эффект расплывания изображения 1161
Эффект Томсона 78
Эффект Холла 78

Я

Японские испытательные циклы, легковые автомобили/грузовые автомобили малой грузоподъемности 506

Указатель сокращений

A :

ABC: Active Body Control. Активное управление, АУ

ABS: Antilock Braking System. Антиблокировочная система тормозов, АБС

AC: Alternating Current. Переменный ток

ACC: Adaptive Cruise Control. Система адаптивного контроля за движением на маршруте или круиз-контроля

ACEA Association des Constructeurs Europeens d'Automobile. Ассоциация европейских автопроизводителей автомобилей

ACSD: Automatic Child-Seat Detection. Автоматическое определение наличия детского кресла

ADC: Analog-Digital Converter. Аналого-цифровой преобразователь, АЦП

ADR: Advanced Digital Receiver. Усовершенствованный цифровой приемник

ADR: Australian Design Rule. Нормы безопасности Австралии

AE: Automotive Electronics. Автомобильная электроника

AEB: Automatic Emergency Braking. Автоматическое экстренное торможение

AFC: Anti Friction Coating. Антифрикционное покрытие

AFS: Adaptive Frontlighting System. Адаптивная система фар

AGI: Air Gap Insulated. Изоляция воздушным зазором

AGM: Absorbent Glass Mat. Поглощающий стеклянный мат

AHP: Accelerator Heel Point. Положение ступни на педали «газа»

ALB: Automatische Lastabhangige Bremse. Антиблокировочный тормоз

AM-LCD: Active Message Liquid Crystal Display. ЖК-дисплей с активной адресацией

AM: Amplitude Modulation. Амплитудная модуляция

AMR: Anisotropic Magnetoresistive. Анизотропный магнитоустойчивый материал

AOS: Automotive Occupancy Sensing. Автоматическое определение размещения пассажиров в автомобиле

API: Application Programmer Interface. Программный интерфейс

API: American Petroleum Institute Classification. Американский институт нефти

ARI: Autofahrer-Rundfunk-Information. Радиоинформация для водителя

ART: Abstandsregeltempomat. Активный круиз-контроль

AS: Ackerschlepper. Сельскохозяйственные тракторы

AS: Air System. Пневмосистема

ASAM: Association for Standardization of Automation and Measuring Systems. Ассоциация стандартизации автоматизационных и измерительных систем

ASF: Audi Space Frame. Алюминиевая рама автомобиля для навешивания листовых панелей, разработка фирмы Audi

ASIC: Application Specific Integrated Circuit. Прикладная интегральная схема

ASM: Asynchronous Machine. Асинхронная электрическая машина

ASM: Anhangersteuermodul. Модуль управления прицепом

ASTM: American Society of Testing and Materials. Американское общество по испытанию материалов

ASU: Automatische Storunterdruckung. Автоматическое подавление радиопомех

AT: Advanced Technology. Передовые технологии

ATF: Automatic-Transmission Fluid. Масло для автоматических трансмиссий

ATL: Abgasturbolader. Турбокомпрессор, приводимый в действие отработавшими газами

Autosar: Automotive Open Systems Architecture. Открытая системная архитектура для автомобилестроения

AWD: All Wheel Drive. Привод на все колеса

B:

BCD: Bipolar, CMOS, DMOS. Биполярный, КМОП, ДМОП

BCI: Bulk Current Injection. Инжекция объемного тока

BCM: Body Computer Module. Блок кузовной электроники

BDC: Bottom Dead Center. Нижняя мертвая точка

BEM: Boundary-Element Method. Метод граничных элементов

BIP: Beginning of Injection Period Signal. Сигнал начала периода впрыска

BM: Bus-Minus. Шина-минус

BMD: Bag Mini Diluter. Система разбавления отработавших газов

BP: Bus-Plus. Шина-плюс

BSR: Battery Status Recognition. Система определения состояния АКБ

BSS: Byte Start Sequence Стартовая байтовая очередность

BSW: Basic Software. Базовое программное обеспечение

BtL: Biomass to Liquid. Биомасса-в-жидкость

C:

CA: Crankshaft Angle. Угол поворота коленчатого вала

CAD: Computer-Aided Design. Система компьютерного проектирования

CAE: Computer-Aided Engineering. Система компьютерного конструирования

CAFE: Corporate Average Fuel Economy. Средний общий расход топлива

CAL: Computer-Aided Lighting. Программа для расчета освещения

CAN: Controller Area Network. Бортовой контроллер связи

CARB: California Air Resources Board. Калифорнийский совет по воздушным ресурсам

CBE: Cab-Behind-Engine. Автомобиль с кабиной позади двигателя

CBS: Combined Brake System. Комбинированная тормозная система

CCD: Charge-Coupled Device. Прибор с зарядовой связью, ПЗС

CCD: Complex Device Drivers. Драйверы сложных устройств

CCFL: Cold-Cathode Fluorescence Lamp. Флуоресцентная лампа с холодным катодом

CCMC: Comite des Constructeurs d'Automobile du Marche Commun. Комитет автомобильных производителей общего рынка

CD: Cathodic deposition. Осаждение на катоде

CD: Compact Disc. Компакт-диск

CDPF: Catalyzed Diesel Particulate Filter. Дизельный сажевый фильтр с каталитическим покрытием

CE: Coordination Engine. Координация режимов работы двигателя

CEMEP: European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics. Европейский комитет изготовителей электродвигателей и силовой электроники

CEN: Comite Europeen de Normalisation. Европейская комиссия по стандартизации

CF: Carbon Fibers. Углеволокно

CFD: Computational Fluid Dynamics. Вычислительная газогидродинамика

CFPP: Cold Filter Plugging Point. Точка закупорки холодного фильтра, предельная температура фильтруемости

CFR: Code of Federal Regulations of the United States. Свод федеральных нормативных актов США

CFR: Cooperative Fuel Research. Совместные исследования топлива

CFV: Critical Flow Venturi. Критический расход Вентури

CGPM: Conference Generale des Poids et Mesures. Генеральная конференция по мерам и весам

CGW: Central Gateway. Центральный шлюз

CISC: Complex-Instruction-Set Computing Процессор со сложным набором команд

CISPR: Comite International Special des Perturbations Radioelectriques. Международный особый комитет по радиопомехам

CLD: Chemiluminescence Detector. Хемилюминесцентный детектор

CMMI: Capability Maturity Model Integration. Модель для оценки и систематической оптимизации организации-разработчиков и их процессов

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor. Комплементарный металло-оксидный полупроводник, КМОП

CMRR: Common-Mode Rejection Ratio. Коэффициент ослабления синфазного сигнала

CMVSS: Canadian Motor Vehicle Safety Standard. Канадский стандарт безопасности дорожного движения

CN: Cetane Number. Цетановое число

CNG: Compressed Natural Gas.Сжатый природный газ

CO: Communication. Коммуникация

COD: Conversion of Olefins to Distillates. Преобразование олефинов в дистилляты

COE: Cab-Over-Engine. Автомобиль с кабиной над двигателем

COM: Communication. Коммуникация

COP: Conformity of Production. Соответствие серийно выпускаемой продукции

CP: Circular Pitch. Окружной шаг зацепления

CPC: Condensation Particulate Counter. Конденсационный счетчик твердых частиц

Cpsi: Channels per square inch. Количество каналов на кв. дюйм поверхности

CPU: Central Processing Unit. Микропроцессор

CR: Chloroprene Rubber. Хлоропреновый каучук

CR: Common Rail. Топливная рампа

CRC: Cyclic Redundancy Check. Периодический резервный контроль

CRT: Continuous Regeneration Trap. Сажеуловитель с непрерывной регенерацией

CS: Checksum. Контрольная сумма

CtL: Coal-to-Liquid. Уголь-в-жидкость

CTS: Conti Tire System. Система шин Continental

CVD: Chemical Vapor Deposition. Химическое осаждение пара

CVS: Constant Volume Sampling. Отбор проб газа при постоянном объеме

CVT: Continuously Variable Transmission. Бесступенчатая передача

D:

DAB: Digital Audio Broadcasting. Цифровое аудиовещание

DAC: Digital-Analog Converter. Цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП

DC: Direct Current. Постоянный ток

DCT-C: Dynamic Coupling Torque at Center. Динамический крутящий момент при сочленении в центре

DCT: Dynamic Coupling Torque. Динамический крутящий момент

DDA: Digital Directional Antenna. Направленная цифровая антенна

DDS: Digital Diversity System. Система цифровой диверсификации

DEQ: Digital Equalizer. Цифровой эквалайзер

DF: Dynamo-Field. Динамо-поле

DFM: Dynamo-Field Monitor. Монитор динамо-поля

DI: Direct Injection. Непосредственный впрыск Топлива

DIN: Deutsches Institut fur Normung. Немецкий институт стандартизации

DIS: Draft International Standard. Проект международного стандарта

DLC: Diamond-like Carbon. Алмазоподобный углерод

DMOS: Digital MOS Transistor. МОП-структура, изготовленная методом двойной диффузии, ДМОП-структура

DMS: Differential Mobility Spectrometer. Дифференциальный мобильный спектрометр

DNC: Dynamic Noise Covering. Динамическое шумоподавление

DOC: Diesel Oxidation Catalytic Converter. Каталитический нейтрализатор окислительного типа

DOHC: Double Overhead Camshaft. Двойной верхний распределительный вал

DOT: Department of Transportation. Министерство транспорта США

DPF: Diesel Particulate Filter. Дизельный сажевый фильтр

DRIE: Deep Reactive Ion Etching. Глубокое реактивно ионное травление

DRM: Digital Radio Mondial. Глобальная цифровая радиосистема

DRO: Dielectric Resonance Oscillator. Диэлектрический резонансный генератор

DS: Diagnostic System. Диагностическая система

DSA: Digital Sound Adjustment. Адаптация цифрового сигнала

DSM: Diagnostic System Management. Система управления диагностикой

DSP: Digital Signal Processor. Цифровой процессор сигналов, ЦПС

DSTN-LCD: Double Super Twisted Nematic Liquid Crystal Display. ЖК-дисплей на двойном скрученном нематике

DTCO: Digital tachograph. Цифровой тахограф

DTS: Dynamic Trailing Sequence. Динамическая конечная запись

DVB: Digital Video Broadcasting. Цифровое видеовещание

DVB-C: Digital Video Broadcasting Cable. Кабель для цифрового видеовещания

DVB-H: Digital Video Broadcasting Handhelds. Портативное устройство для цифрового видеовещания

DVB-S: Digital Video Broadcasting Satellite. Спутник для цифрового видеовещания

DVB-T: Digital Video Broadcasting Terrestrial. Наземное устройство для цифрового видеовещания

DVD: Digital Versatile Disc. Цифровой многофункциональный диск, DVD-диск

DWT: Dynamic Wheel Torque Distribution. Динамическое распределение крутящего момента колеса

E:

E/E: Electrical/Electronic. Электрический/электронный

EAC: Electronic Air Control. Электронный блок обработки воздуха

EBA: Emergency Brake Assist. Помощь в экстренном торможении

EBS: Electronic Battery Sensor. Электронный датчик АКБ

EBS: Electronic Braking System. Электронная тормозная система

EC: European Community. Европейское сообщество

EC EC: Exhaust Closes. Закрытие выпускного клапана

EC: Electronically commutating motor. Электронно коммутируемый двигатель

ECE: Economic Commission for Europe. Европейская экономическая комиссия ООН, ЕЭК ООН

ECU: Electronic Control Unit. Электронный блок управления системы, ЭБУ

EDC: Electronic Diesel Control. Электронное управление дизельным двигателем

EEC: European Economic Community. Европейское экономическое сообщество

EEM: Electrical Energy Management. Система управления электроэнергией

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory. Электронно-перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство

EEV: Enhanced Environmentally Friendly Vehicle. Усовершенствованный экологически чистый автомобиль

EFF: Designation of efficiency classes for electrical machines. Классификация эффективности электродвигателей

EG: Eigenlenkgradient. Градиент самовыравнивания

EGR: Exhaust-Gas Recirculation. Рециркуляция отработавших газов

EH: Extended Hump. Расширенный горб

EHB: Electrohydraulic Brake. Электрогидравлическая тормозная система

EIR: Emission Information Report. Информационный отчет по количеству выбросов

EIRP: Equivalent Isotropic Radiated Power. Эквивалентная изотропная излучаемая мощность

EIS: Electrochemical Impedance Spectroscopy. Электрохимическая импедансная спектроскопия

ELB: Electronically controlled braking system. Тормозная система с электронным управлением

ELPI: Electrical Low Pressure Impactor. Электрический импактор низкого давления

ELR: European Load Response. Европейский цикл испытаний реакции на нагрузку

EM: Excavating Machine. Экскаваторная техника

EMC: Electromagnetic compatibility. Электромагнитная совместимость, ЭМС

EMD: Engine Manufacturer Diagnostics. Диагностика двигателя производителем

EMP: Electromechanical Parking Brake. Электромеханический стояночный тормоз

EN: Europaische Norm. Европейский стандарт

EO: Exhaust Opens. Открытие выпускного клапана
EOBD: European On-Board Diagnosis. Европейская бортовая диагностика
EP: Extreme Pressure. Чрезмерное давление
EPA: Environment Protection Agency. Агенство по защите окружающей среды США
EPDM: Ethylene Propylene Diene Monomer. Каучук на основе сополимера этилена, пропилена и диенового мономера
EPM: Engine & Powertrain Manager. Управление двигателем и трансмиссией
EPROM: Erasable Programmable Read Only Memory. Стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство, СППЗУ
ES: Exhaust System. Выпускная система
ESC: European Steady-State Cycle, Европейский цикл испытаний в стационарном режиме
ESI: Electronic Service Information. Электронная сервисная информация
ESP: Electronic Stability Control. Электронный контроль устойчивости (система динамической стабилизации)
ESS: Energy Saving System. Система сохранения энергии
ETBE: Ethyl Tertiary Butyl Ether. Этиловый третично-бутиловый эфир
ETC: European Transient Cycle. Европейский цикл испытаний в переходных режимах
ETC: Electronic Throttle Control. Электронное управление дроссельной заслонкой
ETC: Electronic Transmission Control. Электронная система управления коробкой передач
ETN: European Type Number. Европейский стандарт на номерные знаки
ETRTO: European Tire and Rim Technical Organization. Европейская организация по изучению шин и ободов
EU: European Union. Европейский союз, ЕС
EUC: Enhanced Understeering Control. Расширенное управление недостаточной поворачиваемостью
EUDC: Extra Urban Driving Cycle. Загородный цикл движения
EVAP: Evaporation. Испарение
EWIR: Emissions Warranty Information Report. Гарантийный информационный отчет

F:

FA: Front Axle. Передняя ось
FAEE: Fatty Acid Ethyl Ester. Этилэфиры на основе жирных кислот
FAME: Fatty Acid Methyl Ester. Метилэфиры на основе жирных кислот
FC-REX: Fuel Cell Range Extender. Топливный элемент с расширенным диапазоном
FC: Fuel Cells. Топливные элементы
FCHV: Fuel Cell Hybrid Vehicle. Гибридный автомобиль на топливных элементах
FEA: Finite-Element Analysis. Анализ методом конечных элементов
FEM: Finite-Element Method. Метод конечных элементов
FES: Frame End Sequence. Последовательность конца кадра
FET: Field-Effect Transistor. Полевой транзистор
FFV: Flexible Fuel Vehicle. Многотопливный автомобиль
FH: Flat Hump. Плоский горб
FID: Flame Ionization Detector. Пламенно-ионизационный детектор

FiL: Function-in-the-Loop. Циклические испытания функции
FIR: Far Infrared. Дальняя инфракрасная область спектра
FIR: Field Information Report. Отчет об эксплуатации
FM: Frequency Modulation. Частотная модуляция
FMCW: Frequency-ModulatedContinuous Wave. Непрерывная волна с частотной модуляцией
FMEA: Failure Mode and Effects Analysis. Анализ характера и последствий отказа
FMVSS: Federal Motor Vehicle Safety Standards. Федеральные стандарты автомобильной безопасности США
FRAM: Ferromagnetic RAM. Ферромагнитное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)
FS: Fuel System. Топливная система
FSN: Filter Smoke Number. Дымовое число фильтра
FSR: Full Speed Range. Полный диапазон скоростей
FSS: Frame Start Sequence. Последовательность начала кадра
FST: Federal Smoke Test. Федеральная процедура проверки дымности
FTA: Fault Tree Analysis. Дерево отказов
FTIR: Fourier Transform Infrared (Spectroscopy). Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье
FTP: Federal Test Procedure. Федеральный цикл испытаний США
FW: Front Wheel. Переднее колесо

G:

GC: Gas-Chromatography Column. Хроматографическая колонка
GCC: Global Chassis Control. Глобальное управление шасси
GF: Glass Fiber. Стекловолокно
GIDAS: German In-Depth Accident Study. Германские правила подробного разбора причин аварии
GLP: Glow Plug. Свеча накаливания
GMR: Giant Magnetoresistive. Супермагниторезистивность
GPRS: General Packet Radio Service. Пакетная радиосвязь общего назначения
GPS: Global Positioning System. Глобальная спутниковая система позиционирования
GSM: Global System for Mobile-Communication. Глобальная система мобильных средств связи
GSY: Geschwindigkeitssymbol. Индекс скорости
GtL: Gas-to-Liquid. Газ-в-жидкость
GWP: Global Warming Potential. Потенциал глобального потепления

H:

HC: Hydrocarbon. Углеводороды
HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition. Воспламенение от сжатия гомогенного заряда топлива
HCI: Hydro Carbon Injection. Впрыск углеводородов
HD: Heavy Duty. Грузовик
HDDTC: Heavy-Duty Diesel Transient Cycle. Переходной цикл испытаний тяжелых грузовых автомобилей с дизельными двигателями
HED: High-Dfficiency Diode. Эффективный диод
HEV: Hybrid Electric Vehicle. Гибридный автомобиль
HF: High Frequency. Высокая частота
HFM: Hot-film air-mass meter. Датчик массового расхода воздуха
HFRR: High-Frequency Reciprocating Rig. Установка с высокочастотным возвратно-поступательным движением рабочего органа

HHC: Hill-Hold Control. Система помощи при троганьи на подъеме

HiL: Hardware-in-the-Loop. Циклические испытания аппаратного обеспечения

HLDT: Heavy-Light-Duty Truck. Тяжелый грузовой автомобиль малой грузоподъемности

HLM: Hitzdraht-Luftmassenmesser. Тепловой измеритель массового расхода воздуха

HNBR: Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber. Гидрогенизированный нитрилбутадиеновый каучук

HNS: Homogeneous Numerically Calculated Surface. Однородная численно определенная поверхность

HSLA: High Strength Low Alloy. Высокопрочная низколегированная тонколистовая сталь

HSV: High-Pressure Switching Valve. Переключающий клапан высокого давления

HTD: High Torque Drive. Привод с высоким крутящим моментом

HTHS: High Temperature High Shear. Высокая температура и высокое сопротивление сдвигу

HUD: Head-Up Display. Проекционный бортовой индикатор

HV: High Voltage. Высокое напряжение

HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning. Обогрев, вентиляция, кондиционирование воздуха в салоне автомобиля

I:

I/O: Input/Output. Вход/выход

IC: Intake Closes. Закрытие впускного клапана

IC: Integrated Circuit. Монолитная интегральная схема

IC: Intercooling. Промежуточное охлаждение

ICC: Integrated Chassis Control. Интегрированный контроль шасси

ICM: Integrated Chassis Management. Интегрированное управление шасси

ID: Identifier. Идентификатор

IDI: Indirect Injection. Непрямой впрыск

IEC: International Electrotechnical Commission. Международная электротехническая комиссия, МЭК

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers. Институт инженеров по электротехнике и электронике

IF: Intermediate Frequency. Промежуточная частота

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors. Биполярные транзисторы с изолированным затвором

IGES: Initial Graphics Exchange Specification. Исходный стандарт обмена графическими данными

IHU: Integrated Head Unit. Блок со встроенной головкой

IMC: Integrated Magnetic Concentrator. Встроенный магнитный концентратор

IO: Intake Opens. Открытие впускного клапана

IP: Ignition Point. Момент зажигания

IP: Internet Protocol. Интернет-протокол

IR: Infrared. Инфракрасный

IR: Individualregelung. Индивидуальное управление

IRM: Individualregelung modifiziert. Индивидуальное модифицированное

IS: Ignition System. Система зажигания

ISM: Industrial, Scientific and Medica. Промышленные, научные и медицинские

ISO: International Organization for Standardization. Международная организация по стандартизации, ИСО

IT: Information Technology. Информационные технологии

ITDC: Ignition Top Dead Center. Зажигание до верхней мертвой точки

ITSEC: Information Technology Security Evaluation Criteria. Стандарт для оценки безопасности компьютерных систем

ITU: International Telecommunications Union. Международный союз электросвязи, МСЭ

IUMPR: In-Use Monitor Performance Ratio. Показатель постоянного мониторинга

IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry. Международный союз по чистой и прикладной химии, ИЮПАК

J:

JAMA: Japan Automobile Manufacturers Association. Японская ассоциация автопроизводителей

JASPAR: Japan Automotive Software Platform Architecture. Архитектура программных платформ для японской автомобильной промышленности

JFET: Junction Field-Effect Transistor. Полевой транзистор с управляющим p-n-переходом

K:

KAMA: Korea Automobile Manufacturers Association. Архитектура программных платформ для корейской автомобильной промышленности

KBA: Kraftfahrt-Bundesamt. Германское Федеральное агентство по регистрации транспортных средств

KTS: Diagnostics Hardware Kleintester. Малогабаритный диагностический тестер

KW: Kurzwellen. Короткие волны

L:

LAC: Load Adaptive Control. Управление с адаптацией к нагрузке

LAN: Local Area Network. Локальная сеть

LCD: Liquid Crystal Display. Жидкокристаллический дисплей

LCV: Light Commercial Vehicles. Малотоннажные грузовые автомобили

LDR: Light-Dependent Resistor. Фоторезистор

LDT: Light-Duty Truck. Грузовой автомобиль малой грузоподъемности

LDV: Light-Duty Vehicle. Транспортное средство малой грузоподъемности

LED: Light-Emitting Diode. Светодиод

LEV: Low-Emission Vehicle. Малотоксичное транспортное средство

LI: Load Index. Индекс грузоподемности

Lidar: Light Detection and Ranging. Лазерный локатор ИК-диапазона

LIN: Local Interface Network. Локальная сеть

LLDT: Light-Light-Duty Truck. Малотоннажный грузовой автомобиль малой грузоподъемности

LNG: Liquified Natural Gas. Сжиженный природный газ

LPG: Liquified Petroleum Gas. Сжиженный нефтяной газ

LR: Load response. Реагирование нагрузки

LRD: Load Response Driving. Движение в зависимости от нагрузки

LRR: Long-Range Radar. Радар большой дальности

LRS: Load-Response Start. Пуск по изменению нагрузки

LSB: Least Significant Bit. Младший двоичный разряд

LSF: Low-Speed Following. Отслеживание по малым скоростям

LSG: Laminated Safety Glass, Триплексное безопасное стекло

LSI: Large-Scale Integration. Высокая степень интеграции

LSU: Lambda-Sonde. Широкополосный кислородный датчик, лямбда-зонд

LVDS: Low Voltage Differential Signaling. Дифференциальные сигналы низкого напряжения

LW: Long Wave. Длинные волны

LWS: Lenkwinkelsensor. Датчик угла поворота рулевого колеса

M:

MAG: Metall-Aktivgas. Дуговая сварка металлическим электродом в среде активного газа

MAMAC: MOST Asynchronous Medium Access Control. Асинхронное управление доступом к среде MOST

MB: Mercedes Benz. Мерседес-Бенц

MCAL: Micro-Controller Abstraction Layer. Абстрактный уровень микроконтроллера

MCD: Measurement, Calibration and Diagnosis. Измерения, калибровка и диагностика

MDPV: Medium-Duty Passenger Vehicle. Грузопассажирский автомобиль средней грузоподъемности

MDV: Medium-Duty Vehicle. Транспортное средство средней грузоподъемности

MIL: Malfunction Indicator Lamp. Лампа индикации неисправности

MIL: Model-in-the-Loop. Циклические испытания модели

MISRA: Motor Industry Software Reliability Association. Ассоциация разработчиков программного обеспечения для автомобилей

MKS: Mehrkörper Simulation. Моделирование нескольких кузовов

ML: Maturity Level. Уровень зрелости программного обеспечения

MMT: Methylcyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl. Метилциклопентадиенил магний-трикарбонил

MNEDC: Modified New European Driving Cycle. Модифицированный европейский цикл испытаний

MO: Monitoring. Мониторинг

MON: Motor Octane Number, Моторный метод определения октанового числа

MOS: Metal-Oxide Semiconductor. Металл-оксид-полупроводник, МОП

MOSFET: MOS Field Effect Transistor. МОП-транзистор

MOST: Media-Oriented Systems Transport. Широковещательные информационные системы для транспорта

MPEG: Moving Picture Experts Group. Экспертная группа по вопросам движущегося изображения

mpg: miles per gallon. мили на галлон топлива

MPI: Multi-Point Injection. Многоточечный, распределенный впрыск топлива

MPT: Multi-Purpose Tire. Универсальная шина

MRAM: RAM utilizing the magnetic effect as the memory principle. ОЗУ на основе магнитоэффекта

M+S: Matsch und Schnee. Зимние шины «грязь+снег»

MSB: Most Significant Bit. Старший двоичный разряд

MSI: Medium-Scale Integration. Средняя степень интеграции

MSI: Multispark Ignition. Многоискровое зажигание

MSR: Motorschleppmomentregelung. Контроллер крутящего момента

MTBE: Methyl Tertiary Butyl Ether. Метиловый третично-бутиловый эфир
MTCO: Modular Tachograph. Модульный тахограф
MW: Medium Wave. Средние волны

N:

NCAP: New Car Assessment Program. Программа оценки новых автомобилей
NDIR: Non-Dispersive Infrared (analyzer). Недисперсионный инфракрасный анализатор
NHTSA: National Highway Traffic Safety Administration. Национальная администрация по безопасности дорожного движения
NIC: Network Interface Controller. Контроллер сетевого интерфейса
NIR: Near Infrared. Ближняя ИК-область спектра
NIT: Network Idle Time. Время простоя сети
NLGI: National Lubricating Grease Institute. Национальный институт смазочных материалов
NMHC: Non-Methane Hydrocarbon. Неметановые углеводороды
NMOG: Non-Methane Organic Gases. Неметановый органический газ
NMOS: N-channel MOS Transistor. n-канальный МОП-транзистор
NRZ: Non Return to Zero. Без возврата к нулю
NSC: NOx Storage Catalyst. Каталитический нейтрализатор NOx
NTC: Negative Temperature Coefficient. Терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом
NTE: Not To Exceed. Непревышение
NVH: Noise Vibration Harshness. Шум, вибрация, резкость
NYCC: New York City Cycle. Нью-Йоркский городской цикл

O:

OBD: On-Board Diagnosis (system). Бортовая диагностика (система)
OC: Occupant Classification. Классификация пассажиров
OD: Operating Data. Эксплуатационные данные
OD: Outside Diameter. Внешний диаметр
ODB: Offset Deformable Barrier. Удар со смещением о деформируемое препятствие
OE: Original Equipment. Оригинальное оборудование
OHC: Overhead Camshaft. Верхний распределительный вал
OHV: Overhead Valves. Верхнее расположение клапанов
OPA: Operational Amplifier. Операционный усилитель
OS: Operating System. Операционная система
OSEK: Open systems and their interfaces for the electronics in motor vehicles. Открытые системы и их интерфейсы для автомобильной электроники
OSI: Open Systems Interconnection. Взаимодействие открытых систем
OTDC: Overlap Top Dead Center. Перекрытие впускных и выпускных клапанов в ВМТ
OTX: Open Test Sequence Exchange Format. Формат обмена с открытой последовательностью испытаний

P:

PA: Polyamide. Полиамид

PAS: Peripheral Acceleration Sensor. Периферийный датчик ускорения
PAX: Pneu Accrochage, X. Радиальная технология шин Michelin
PBT: Polybutylene Terephthalate. Полибутилен-терефталат
PC: Personal Computer. Персональный компьютер
PC: Polycarbonate. Поликарбонат
PCB: Printed Circuit Board. Печатная плата
PCM: Phase Change Memory. Память на основе фазового перехода
PCW: Predictive Collision Warning. Система предупреждения о столкновении
PDP: Positive Displacement Pump. Вытеснительные насосы
PDU: Protocol Data Unit. Протокольная единица обмена
PE: Polyethylene. Полиэтилен
PEBS: Predictive Emergency-Braking System. «Предупреждающая» система экстренного торможения
PEEK: Polyetheretherketone. Полиэфиркетон
PEM: Polymer Electrolyte Membrane. Полимерная электролитная мембрана
PEMS: Portable Emission Measurement System. Портативное устройство измерения выбросов
PES: Poly-Ellipsoid System. Полиэлипсоидная система
PET: Polyethylene Terephthalate. Полиэтилен терефталат
PK: Profilkurzzeichen. Код профиля
PLL: Phase-Locked Loop. Цепь фазовой автолодстройки частоты
PM: Particulate Matter Твердые частицы
PMD: Photonic Mixer Device Фотонный микшер
PMMA: Polymethyl Methacrylate. Полиметилметакрилат
PMOS: P-channel MOS Transistor. p-канальный МОП-транзистор
POF: Polymer Optical Fibers. Полимерное оптоволокно
POI: Points of Interest. Точки интереса (на карте)
POM: Polyoximethylene. Полиоксиметилен
PP: Polypropylene. Полипропилен
PPS: Peripheral Pressure Sensor. Периферийный датчик давления
PPS: Polyphenylene Sulfide. Сульфид полифенилена
PROM: Programmable Read Only Memory. Программируемое постоянное запоминающее устройство, ППЗУ
PSI: Peripheral Sensor Interface. Интерфейс перифейных датчиков
PSM: Passive Safety Manager. Управление пассивной безопасностью
PSOC: Partial State Of Charge. Частичное состояние заряда
PSRR: Power-Supply Rejection Ratio. Коэффициент ослабления пульсаций питания
PTC: Positive Temperature Coefficient. Терморезистор с положительным температурным коэффициентом
PTFE: Polytetrafluoroethylene. Политетрафторэтилен (тефлон)
PTO: Power Take-Off. Отбор мощности
PUR: Polyurethane. Полиуретан
PVB: Polyvinyl Butyral. Поливинил бутирал
PVC: Polyvinylchloride. Поливинилхлорид
PVD: Physical Vapor Deposition. Физическое осаждение паров
PWM: Pulse Width Modulation. Широтно-импульсная модуляция, ШИМ
PZEV: Partial Zero-Emission Vehicle. Автомобиль с низким уровнем токсичных выбросов

Q:

QFD: Quality Function Deployment. Структурирование функции качества

QVGA: Quarter Video Graphics Array. Видеографическая матрица

R:

RA: Rear Axle. Задняя ось

RAM: Random Access Memory. Запоминающее устройство с произвольным доступом

RAMSIS: Computeraided anthropological-mathematical system for passenger simulation. Компьютерная антропо-математическая система для имитации пассажиров

RDS: Radio Data System. Система передачи радиоданных

RIM: Reaction-Injection Molding. Реакционное инжекционное формование

RISC: Reduced Instruction Set Computing. Компьютер с сокращенным набором команд

RMF: Rollover Mitigation Functions. Функции подавления опрокидывания

RMQ: Root Mean Quad. Метод среднеквадратических значений

RMS: Root Mean Square. Среднеквадратичное действующее значение

ROM: Read Only Memory. Постоянное запоминающее устройство

RON: Research Octane Number. Исследовательский метод определения октанового числа

RREG: Richtlinie des Rates der Europaischen Gemeinschaft. Директива Евросоюза

RRIM: Reinforced Reaction-Injection Molding. Усиленное реактивное литье под давлением

RTA: Real-Time Architect. Архитектура реального времени (операционная система для встроенного ПО)

RTE: Runtime Environment. Среда прогона

RW: Rear Wheel. Заднее колесо

RWAL: Rear Wheel Anti-Lock. Антиблокировочная система для задних колес

S:

SAE: Society of Automotive Engineers. Общество автомобильных инженеров

SBC: Sensotronic Brake Control. Сенсотронное управление тормозами

SC: System Control. Управление работой системы

SCR: Selective Catalytic Reduction. Селективное каталитическое восстановление

SD: Secure Digital. Формат флэш-карт

SD: System Document. Системный документ

SDARS: Satellite Digital Audio Radio Services. Спутниковая цифровая аудиослужба

SEI: Software Engineering Institute. Институт программной инженерии

SEL: Sound Exposure Level. Нормативы на уровень громкости звука

SFTP: Supplement Federal Test Procedure. Дополнительная федеральная процедура испытаний

SHED: Sealed Housing for Evaporative Determination. Герметичная камера для определения выбросов топливных паров

SHF: Super High Frequency. Сверхвысокая частота

SI: Spark Ignition. Искровое зажигание

SI: Systeme International d'Unites. Международная система единиц, СИ

SIL: Safety Integrity Level. Уровень интеграции безопасности

SIL: Software-in-the-Loop. Циклические испытания программного обеспечения

SIS: Service Information System. Информационная система

SL: Select Low (ABS). Низкопороговое регулирование (ABS)

SMC: Sheet Moulding Compound. Листовая формовочная масса

SMD: Surface-Mounted Device. Компоненты поверхностного монтажа

SMM: Surface Micromechanics. Поверхностная микромеханика

SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer. Сканирующий мобильный определитель размеров частиц

SMS: Short Message Service. Служба коротких сообщений

SOC: State Of Charge. Состояние заряда

SOF: State Of Function. Состояние функции

SOH: State Of Health. Состояние аккумуляторной батареи

SPICE: Software Process Improvement and Capability Determination. Совершенствование процессов в разработке ПО и определение возможностей

SR: Slew Rate. Скорость нарастания выходного напряжения

SRET: Scanning Reference-Electrode Technique. Метод сканирования с использованием эталонного электрода

SRP: Seating Reference Point. Базовая точка сиденья

SRR: Short-Range Radar. Радар малой дальности

SSI: Small-Scale Integration. Низкая степень интеграции

STEP: Standard for the Exchange of Product Model Data. Стандарт по обмену данными моделей изделий

STN LCD: Super Twisted Nematic Liquid Crystal Display. ЖК-дисплей на скрученном нематике

StVZO: Straßenverkehrszulassungsordnung. Немецкие технические требования к эксплуатации безрельсового транспорта

SULEV: Super Ultra-Low-Emission Vehicle. Автомобиль со сверхмалым уровнем токсичных выбросов

SUV: Sports Utility Vehicle. Легкий внедорожник

SW: Short Wave. Короткие волны

SWC: Software Component. Компонент программного обеспечения

T:

TA: Type Approval. Типовые испытания на соответствие техническим условиям

TAS: Torque Angle Sensor. Датчик угла крутящего момента

TC: Transient Cycle. Переходный цикл

TCP: Transmission Control Protocol. Протокол управления передачей

TCS: Traction Control System. Система контроля тягового усилия

TD: Torque Demand. Требуемый крутящий момент

TDC: Top Dead Center. Верхняя мертвая точка

TDMA: Time-Division Multiplex Access. Множественный доступ с квантованием

TEM: Transverse Electromagnetic Mode. Режим поперечных электромагнитных волн

TFT: Thin-Film Transistor. Тонкопленочный транзистор

TIER: Technical Independent Evaluation Report. Технический доклад по независимой оценке

TLEV: Transitional Low-Emission Vehicle. Переходной стандарт по нормам токсичности ОГ

TMC: Traffic Message Channel. Канал передачи сообщений о дорожном движении

TN LCD: Twisted Nematic Liquid Crystal Display. ЖК-дисплей на скрученном нематике

TOF: Time Of Flight. Время полета

TPEG: Transport Protocol Expert Group. Группа экспертов по транспортному протоколу

TPMS: Tire-Pressure Monitoring System. Система контроля давления в шинах

TRX: Tension Repartie. Распределенное напряжение

TS: Technical Specification. Технические спецификации

TS: Torque Structure. Структура крутящего момента

TSG: Toughened Safety Glass. Безопасное стекло с высокой ударной вязкостью

TSM: Trailer Sway Mitigation. Подавление раскачивания прицепа

TSS: Transmission Start Sequence. Стартовая очередность передачи

TTCAN: Time-Triggered CAN. Шина данных CAN с регулировкой по времени

TV: Television. Телевидение

U:

UDC: Urban Driving Cycle. Городской цикл движения

UDDS: Urban Dynamometer Driving Schedule. Городской динамический цикл

UFOME: Used Frying Oil Methyl Ester. Метиловые эфиры, получаемые из отходов

UHF: Ultra-High Frequency. Ультравысокая частота, УВЧ

UIS: Unit Injector System. Система с электронно-управляемыми насос-форсунками

ULEV: Ultra-Low-Emission Vehicle. Автомобиль с ультранизким уровнем токсичных выбросов

ULSD: Ultra-Low-Sulfur Diesel. Дизельное топливо с ультранизким содержанием серы

ULSI: Ultra-Large-Scale Integratio. Ультравысокая степень интеграции

UMTS: Universal Mobile Telecommunication System. Универсальная система мобильной связи

UN: United Nations. Организация Объединенных Наций, ООН

UPS: Unit Pump System. Система с насосами, встроенными в блок цилиндров двигателя

UTP: Unshielded Twisted Pairs. Неэкранированная витая пара

UV: Ultraviolet. Ультрафиолет

UWB: Ultra Wide Band. Ультрашироколосный

V:

VCI: Volatile Corrosion Inhibitor. Летучие ингибиторы коррозии

VCO: Voltage-Controlled Oscillator. Генератор, управляемый напряжением

VDA: Verband der Automobilindustrie. Ассоциация автомобильной промышленности Германии

VDA-FS: Verband der Automobilindustrie – Flachenschnittstelle. Интерфейс для технических характеристик элементов и точек, установленный Ассоциацией автомобильной промышленности Германии

VDE: Verband Deutscher Elektrotechniker. Союз немецких электротехников

VDI: Verein Deutscher Ingenieure. Союз немецких инженеров

VDM: Vehicle Dynamics Management. Управление динамикой автомобиля

VDU: Vehicle Dynamics Unit. Блок управления динамикой автомобиля

VDX: Vehicle Distributed Executive. Распределенное управление автомобилем

VE: Verteilereinspritzpumpe. Распределительный ТНВД

VFB: Virtual Function Bus. Виртуальная функциональная шина

VFD: Vacuum Fluorescence Display. Вакуумно флуоресцентный дисплей

VGA: Video Graphics Array. Видеографическая матрица

VHAD: Vehicle Headlamp Aiming Device. Устройство регулировки автомобильных фар

VHD: Vertical Hall Device. Вертикальное устройство Холла

VHF: Very High Frequency. Очень высокая частота, ОВЧ

VI: Viscosity Index. Индекс вязкости

VLI: Vapor-Lock Index. Индекс образования паровой пробки

VLSI: Very -Scale Integration. Очень высокая степень интеграции

VMM: Volume Micromechanics. Объемная микромеханика

VOL: Visual Optical Aim Left. Левая горизонтальная граница света и тени

VOR: Visual Optical Aim Right. Правая горизонтальная граница света и тени

VPI: Vapor-Phase Inhibitor. Испаряющиеся ингибиторы коррозии

VTG: Variable Turbine Geometry. Изменяемая геометрия турбины

W:

WdK: Economic Association of the German Rubber Industry. Экономическая ассоциация резиновой промышленности Германии

WHSC: World Harmonized Stationary Cycle. Всемирный гармонизированный стационарный цикл

WHTC: World Harmonized Transient Cycle. Всемирный гармонизированный переходный цикл

WLAN: Wireless Local Area Network. Беспроводная локальная сеть

WLTP: World Harmonized Light Duty Test Procedure. Всемирный гармонизированный упрощенный цикл испытаний

WNTE: World Harmonized Not To Exceed. Всемирная гармонизированная зона «непревышения»

WOT: Wide Open Throttle. Полностью открытая дроссельная заслонка

WWH OBD: World Wide Harmonized OBD. Согласованный международный стандарт OBD

WWW: World Wide Web. Всемирная паутина

X:

XML: Extensible Markup Language. Расширяемый язык разметки гипертекста

Z:

ZEV: Zero-Emission Vehicle. Автомобиль с нулевым уровнем токсичных выбросов

Справочное издание

Автомобильный справочник

Ведущий редактор Виктор Маслов
Обложка и верстка Александр Савин
Корректор Лариса Рассказова

Подписано в печать 30.08.12. Формат 110×175 мм. Бумага Primabook.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 67,2. Тираж 8000 экз.

ООО «Книжное издательство «За рулем»
107045, Москва, Селиверстов пер. д. 10, стр. 1
Для писем: 107150, Москва, 5-й проезд Подбельского, д. 4а

http://shop.zr.ru
Реализация, тел.: (499) 267-30-65, 361-71-81

Отпечатано в типографии GGP Media GmbH,
Karl-Marx-Strasse 24, 07381 Possneck, Deutschland
tel: 8-10-49/3647/ 43 05 54
fax: 8-10-49/3647/ 43 03 77

Автомобильный справочник

Все об автомобильной технике в карманном справочнике.
3-е издание, исправленное и дополненное.

Содержание – основные темы

- Базовые принципы: физика, материалы, детали машин, методы соединения деталей
- Физика транспортных средств: основные термины автомобильной техники, динамика, акустика
- Двигатели внутреннего сгорания: двигатель с искровым зажиганием, дизельный двигатель, турбокомпрессоры и нагнетатели, системы выпуска отработавших газов
- Контроль за токсичностью отработавших газов и экологические нормы
- Системы управления двигателями с искровым зажиганием: впрыск топлива с внешним смесеобразованием, непосредственный впрыск топлива, альтернативные системы управления двигателем
- Системы управления дизельными двигателями: аккумуляторная топливная система Common Rail
- Альтернативные приводы: гибридные приводы, топливные элементы
- Шасси: подвеска колес, рулевое управление, тормозная система
- Активная безопасность: антиблокировочная система тормозов, система динамической стабилизации автомобиля
- Приборы освещения
- Автомобильное электрооборудование: бортовые электросистемы, стартерные аккумуляторные батареи, электродвигатели, генераторы переменного тока
- Автомобильная электроника: автомобильные сети, шины передачи данных, структура электронных систем, датчики
- Системы помощи водителю: системы помощи при парковке, автомобильная навигация, адаптивный круиз-контроль, системы ночного видения

Информация о Bosch Group
Компания Bosch – один из ведущих мировых поставщиков комплектующих для автомобильной промышленности. Большое количество заявок на патенты и различные изобретения являются веским доказательством ведущей роли компании в области автомобилестроения.

Справочное руководство
для автомобильных инженеров
и автолюбителей

ISBN 978-5-9698-0406-7

978-5-9698-0406-7
9 785969 804067

Автомобильный справочник



BOSCH
Разработано для жизни

издательство
За рулем