

**В.П. БАХАРЕВ, М.Ю. КУЛИКОВ,
И.И. БОРТНИКОВ, А.Г. СХИРТЛАДЗЕ**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В двух частях

Часть 1

**Общие методы проектирования и расчёта.
Надёжность техники**

Под редакцией профессора А.Г. Схиртладзе

**Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по образованию в области автоматизированного
машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки специалистов
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»**

**Старый Оскол
«ТНТ»
2008**

УДК 621
ББК 34.42
Б 30

Рецензенты:

**Заведующий кафедрой технологии автоматизированного
машиностроения Ивановского государственного энергетического
университета доктор технических наук,
профессор *В.А. Полетаев*
доктор технических наук, профессор *А.С. Верешака*
Московский государственный технологический университет
«Станкин»**

Бахарев В.П., Куликов М.Ю., Бортников И.И., Схиртладзе А.Г.
Б 30 Проектирование и конструирование в машиностроении:
учебное пособие: В 2-х ч. Ч. 1. Общие методы проектирования
и расчета. Надёжность техники / В.П. Бахарев, М.Ю. Куликов,
И.И. Бортников, А.Г. Схиртладзе; под редакцией проф.
А.Г. Схиртладзе. — Старый Оскол: ТНТ, 2008. — 248 с.

ISBN 978-5-94178-169-0

Пособие содержит сведения об основных этапах конструкторской проработки изделий машиностроения в процессе проектирования, показатели и методы оценки экономической эффективности конструкции, способы повышения и методы расчёта показателей надёжности конструкций различного функционального назначения, этапы внедрения САПР в конструкторскую практику.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», выполняющих курсовые и дипломные проекты по специальностям 151001 (120100) «Технология машиностроения» и 190201 (150114) «Автомобиле- и тракторостроение». Может быть полезно для студентов экономических специальностей, обучающихся по направлению «Экономика и управление в машиностроении».

УДК 621
ББК 34.42

ISBN 978-5-94178-169-0

© Бахарев В.П., Куликов М.Ю., Бортников И.И.,
Схиртладзе А.Г., 2008
© Оформление. ООО «ТНТ», 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебные планы высшего профессионального образования по специальности «Технология машиностроения» направления обучения 657800 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» по программам обучения «Специалист» включают комплекс дисциплин под грифом «Дисциплины по выбору», содержание которых государственным стандартом ВПО не устанавливается. При этом конструкторская составляющая профессиональной подготовки ограничивается, в основном, проектированием технологической оснастки и расчётом деталей редуктора в курсе «Детали машин и основы конструирования».

Учебными программами этих дисциплин не рассматриваются вопросы оценки надёжности и разработки мероприятий повышения надёжности конструкций сложных изделий. За рамками содержания лекционного курса остаются вопросы экономической целесообразности принимаемых конструкторских решений. В предлагаемом учебном пособии предпринята попытка рассмотрения этих вопросов в учебной практике. Существующие руководства по конструированию [1,2] предназначены, в основном, для конструкторов, имеющих опыт проектирования и фундаментальную подготовку в вопросах прочности конструкций.

В некоторых вузах учебные планы экономических специальностей по программам обучения «Специалист» включают комплекс дисциплин инженерно-технологического содержания, в том числе дисциплину «Основы проектирования и конструирования». Для обучающихся по этим специальностям целесообразен только общий подход к изучению вопросов конструирования с углублением экономических аспектов конструирования. Полагаем, что настоящее пособие будет полезно студентам специальности «Экономика и управление на предприятии (Машиностроение)».

Главы 1, 5, 6 и Введение составлены кандидатом технических наук В.П. Бахаревым, главы 2, 4 написаны док-

тором технических наук М.Ю. Куликовым, глава 3 кандидатом технических наук И.И. Бортниковым. Общее редактирование пособия осуществлено профессором, доктором педагогических наук А.Г. Схиртладзе.

Авторы пособия выражают благодарность коллективу кафедры технологии автоматизированного машиностроения ИГЭУ за полезные замечания, высказанные при обсуждении пособия.

ВВЕДЕНИЕ

ПОНЯТИЕ О ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН

Машиностроение является той отраслью промышленности, которая обеспечивает интенсификацию производства всех других отраслей. Для решения этой задачи необходимо коренное повышение качества продукции самого машиностроения, характерной чертой которого является широкая автоматизация и роботизация, использование гибких автоматизированных производств (ГАИ). В них на качество продукции особенно влияют соблюдение условий взаимозаменяемости, рациональное назначение допусков и посадок, широкое применение микропроцессорной вычислительной техники, автоматизация, как самого процесса измерения, так и математической обработки результатов измерения.

Современные средства измерения в автоматизированном производстве машин становятся управляющими, регулирующими технологический процесс. Эта роль средства измерения по мере автоматизации производства будет возрастать.

В мировой экономике в настоящее время сформировалось понятие «новой экономики», являющейся концепцией построения мировой экономики, для которой характерно небывалое ужесточение конкуренции, «коммодизация» (превращение ранее уникальных продуктов в рядовые), быстрое устаревание технологий, маркетинговых идей и профессий.

Основными характеристиками новой экономики являются:

- увеличение инновационной активности, выражающееся в росте инвестиций в научные исследования, технологические и организационные инновации, опережающей динамике развития высокотехнологичных отраслей промышленности и сферы услуг;
- переход конкуренции из разряда конкуренции высоко-, низкотехнологичных отраслей (отражают технологическую ёмкость оборудования) в конкуренцию технологий (обусловлены квалификационной составляющей трудовых затрат) и изделий;

- масштабное применение информационных технологий в процессе производства и продвижения продукции. Интернет-экономика уничтожает защитные расстояния между конкурентами, количество конкурентов растёт в геометрической прогрессии;
- активизация прямых и обратных связей между различными стадиями инновационного цикла, производителями и потребителями, фирмами, рынком и государством, как в пределах национальных границ, так и в глобальном (всемирном) масштабе;
- интеграция отраслей знаний, развитие междисциплинарных исследований и разработок и т.д. Интеграция предоставляет предприятиям возможности выделиться среди прочих поставщиков и прочно закрепиться в бизнесе клиента.

Такие взаимоотношения предприятий возможны на условиях стандартизации, унификации, взаимозаменяемости конструкции изделий машиностроения и их элементов, а также специализации промышленных предприятий.

Таким образом, в современных условиях предприятия вынуждены изменять свою стратегию, ориентированную на конкуренцию по цене (вследствие низких цен на сырьё, энергоносители и рабочую силу), на конкуренцию по качеству и уникальности предлагаемой продукции. Одним из направлений конкурентной стратегии предприятия в этих условиях является управление цепочкой ценностей (ЦЦ) деятельности предприятия. В рамках стратегии управления ЦЦ не только каждый этап в деятельности предприятия, но и каждая отдельная фирма, участвующая в процессе производства продукции, должна рассматриваться как важная составляющая цепочки создания ценностей продукции для потребителя.

Межфирменная целевая интеграция деятельности предприятия в рамках единого коммерческого цикла строится на основании:

- оценки существующих схем затрат по созданию ценностей, необходимых потребителям на современном этапе;
- проектирования новой схемы затрат на создание новой ЦД;
- подбора производителей цепочки продуктов и услуг, замыкающейся через технологические переделы на конечный продукт.

Унификация, стандартизация, создание и освоение новой техники (СОНТ)

Комплекс мероприятий и работ, связанных с созданием и освоением новой техники (СОНТ), ограничивается обычно понятием «техническая подготовка производства». В этот комплекс в общепринятом смысле слова входят стадии опытно-конструкторских работ (ОКР) и технологического проектирования. Первая стадия — ОКР — включает *конструкторскую подготовку*, т.е. проектирование новых изделий, технические расчёты, создание конструкторской документации; вторая стадия — *технологическую подготовку*: разработку технологических процессов, проектирование оснастки, нормирование операций и расхода материалов, выбор оборудования и способов производства, создание технологической документации (изучается в дисциплине «Технология машиностроения»).

В понятие «создание новой техники» входит как разработка объектов и методов производства, базирующихся на новых открытиях, научных исследованиях и изобретениях, так и модификация, модернизация и унификация с целью, например, повышения экономичности ранее выпускавшихся изделий, а также работы по художественному конструированию (дизайну) и изменению внешнего оформления изделий (тьюнинг). Степень новизны разработки, наличие принципиально новых решений на этапах опытно-конструкторских и технологических работ, как правило, не оговариваются. Однако только на основе принципиально новых технических решений использования новейших открытий и изобретений обес-

печивается интенсификация производства, ускорение его развития, соответствующие эпохе научно-технической революции. Это означает, что этапы научных исследований не могут рассматриваться оторванно от технической подготовки и всех прочих стадий создания новой техники.

Наука всё больше проникает в производство, начинает срастаться с ним и становится самым динамичным и решающим фактором развития производительных сил. Техника, в результате всевозрастающей её сложности, требует мощной теоретической базы. Используя достижения науки, производство поставляет ей технические средства для современных исследований (уникальное оборудование, измерительные приборы, материалы и т.д.). Прикладная наука всё чаще черпает информацию из сферы производства для более глубокого понимания явлений.

Анализ современных тенденций в обеспечении эффективного перехода на выпуск новой продукции позволяет сделать следующие основные выводы:

- с усложнением техники всё более возрастает влияние качества отработки технической документации на быстроту освоения новой техники;
- уровень исходной оснащённости технологических процессов (процент сданной производству к началу освоения оснастки и степень готовности специализированного оборудования и оснастки) должен быть достаточно высоким для успешного освоения новой продукции;
- на выбор метода перехода оказывает непосредственное влияние технологическая среда предприятия, особенности осваиваемой техники, уровень специализации и разделения труда между отраслями и промышленными объединениями.

Структурные связи процесса создания и освоения новой техники показаны на рисунке 1.

Одним из наиболее действенных средств ускорения процесса СОНТ являются унификация и стандартизация конструкций.

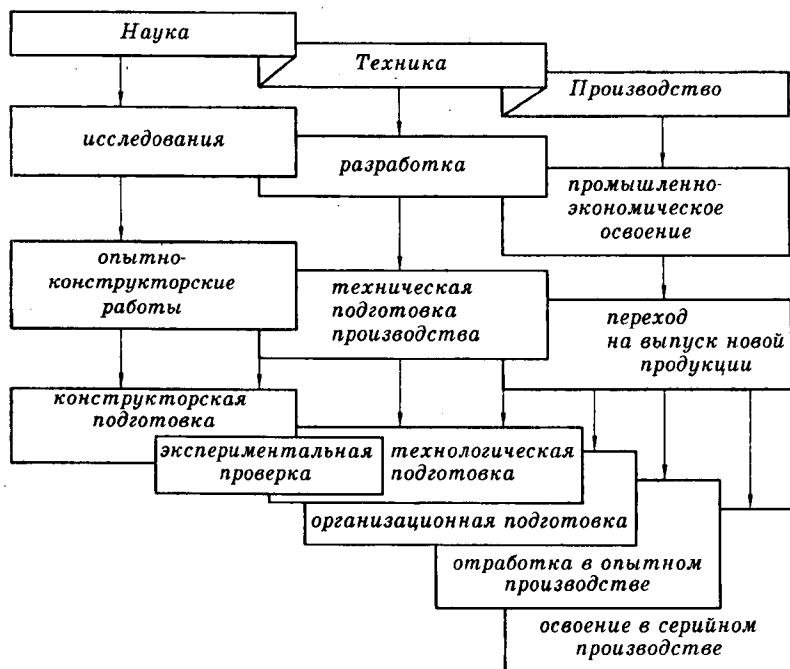


Рис. 1 Структурные связи в процессе создания и освоения новой техники

Конструктивная унификация — это комплекс мероприятий, обеспечивающих устранение необоснованного многообразия типов и конструкций изделий, форм и размеров деталей и заготовок, профилей и марок материалов. В технике осуществляется унификация конструкций узлов и их элементов, методов их изготовления, применяемых профилей и марок материалов, методов инженерных расчётов, технической документации и т.д. Она влияет и на этапы научно-исследовательских работ, позволяя исследователям быстро и с меньшими затратами оснастить лабораторно-исследовательскую базу. Могут быть унифицированы методы исследования, экспериментов, способы решений, приёмы обработки данных, единицы измерений, обозначения, термины, которые обычно стандартизируются.

Этими мероприятиями создают условия для использования преимуществ специализированного производства повторяющихся изделий и их элементов. Конструктивная унификация может относиться к любым объектам как нетехнологического, так и технологического (оснастка, оборудование) назначения. Это мероприятие воздействует и на конструкторскую, и на технологическую, и на организационную (использование готовых конструкций оборудования и оснащения) стадии создания и освоения новой техники.

Возможности, предоставляемые конструктивной унификацией и стандартизацией, включают арсенал таких эффективных методов проектирования, как конструктивная преемственность, агрегатирование, создание конструктивных рядов машин и приборов, создание модификаций на основе базовых конструкций и др. К разновидностям конструктивной унификации относят межразмерную, межтиповую, межвидовую.

Внедрение стандартизации и унификации даёт возможность провести широкое межзаводское кооперирование. Это значительно снижает производственные расходы. Промышленные предприятия могут кооперироваться различными способами. Автомобильное объединение, например, на котором производится сборка готовой продукции — автомобилей (головное предприятие), получает от ряда заводов (предприятий-смежников) продукцию в виде готовых сборочных единиц и изделий, таких, как карбюраторы, шины, тормозные механизмы и др. На этих специализированных предприятиях создаются все предпосылки для полного исключения ручного труда, вследствие широкой механизации и автоматизации производства, внедрения современных технологий.

В настоящее время в нашей промышленности определились следующие формы специализации предприятий (рис. 2). Такая специализация имеет место в настоящее время во всех отраслях промышленности. Под специализацией промышленности понимают такую форму организации произ-

водства, при которой обеспечивается предельное разделение труда.

Разделение труда в сочетании с выпуском однородной продукции в значительных количествах на одном предприятии позволяет совершенствовать производство, удешевлять продукцию.

Специализация и кооперирование производства основаны на территориально независимом изготовлении в первую очередь стандартных и унифицированных изделий. Эти изделия должны в одинаковой степени удовлетворять и конструктивным, и эксплуатационным требованиям. На пред-



Рис. 2 Современные формы специализации предприятий машиностроения

приятнях обособленной отрасли выпускается однородная продукция, рабочие и инженерно-технические работники специализируются на выполнении определённых технологических процессов. Специальное высокопроизводительное оборудование, установленное на предприятии, предназначено для качественного выполнения определённого вида работ.

Виды изделий машиностроения

Изделием называется любой предмет или набор предметов, подлежащих изготовлению на предприятии машиностроения.

Изделия, в зависимости от их назначения, делят на изделия основного и изделия вспомогательного производства. К изделиям основного производства относят изделия, предназначенные для поставки (реализации). Примеры изделий основного производства: самолёт, выпускаемый авиастроительным заводом, подшипник скольжения, изготавливаемый заводом подшипников и пр. К изделиям вспомогательного производства относят изделия, предназначенные только для собственных нужд предприятия. Это инструменты, приспособления и прочие устройства, изготавливаемые на данном предприятии и предназначенные для выпуска изделий основного производства. Если изделие, предназначенное для поставки, используется для собственных нужд предприятия, то его относят к изделиям основного производства.

ГОСТ 2.101 устанавливает следующие виды изделий детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты. В зависимости от наличия составных частей изделия делят на специфицированные, состоящие из двух и более составных частей (сборочные единицы, комплексы, комплекты), и неспецифицированные, не имеющие составных частей (детали).

Деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций, например коленчатый вал из одного куска металла, литой корпус и др.

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клёпкой, сваркой, опрессовкой и т.п.), например автомобиль, станок, подшипник скольжения и т.д. К сборочным единицам также относятся изделия, имеющие общее функциональное назначение и совместно устанавливаемые на предприятии-изготовителе в другую сборочную единицу, например, колпачковая маслёнка для подшипника скольжения, гидропривод станка и пр. Структурной единицей сборочной единицы является деталь, например, вкладыш подшипника.

Комплекс — два и более специфицированных изделия, не соединённых на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, например автоматическая линия станков, корабль, самолёт и т.п. В комплекс входят сборочные единицы и детали, могут входить также детали и сборочные единицы, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например изделия для монтажа комплекса на месте эксплуатации; комплект запасных частей и др.

Комплект — два и более изделий, не соединённых на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих собой набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект запасных частей; комплект инструментов и приспособлений. В комплект могут входить также сборочные единицы, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например трубка с установочными призмами.

Виды конструкторских документов

К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые в отдельности или совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приёмки, эксплуатации и ремонта.

ГОСТ 2.102 устанавливает виды конструкторских документов на изделия всех отраслей промышленности. Рассмотрим определения наиболее часто встречающихся в конструкторской практике документов.

Чертёж детали — документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для её изготовления и контроля. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТа 2.109.

Сборочный чертёж — документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для её сборки (изготовления) и контроля. К сборочным чертежам относят также гидро-, пневмо- и электромонтажные чертежи. Выполняются в соответствии с ГОСТом 2.109.

Чертёж общего вида — документ, определяющий конструкцию изделия и взаимодействие его основных составных частей и поясняющий принцип работы изделия. Выполняется в соответствии с ГОСТами 2.118, 2.119, 2.120.

Теоретический чертёж — документ, определяющий геометрическую форму (обводы) изделия и координаты расположения составных частей.

Габаритный чертёж — документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТа 2.109.

Монтажный чертёж — документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения. К монтажным чертежам относят также чертежи фундаментов, специально разрабатываемые для установки изделия (требования ГОСТа 2.109).

Схема — документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Номенклатура различных видов схем и требования к ним установлены ГОСТом 2.701.

Спецификация — документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТа 2.108.

Технические условия — документ, содержащий требования (совокупность всех показателей норм, правил и положений) к изделию, его изготовлению, контролю, приёмке, поставке и эксплуатации, которые нецелесообразно указывать в других конструкторских документах. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТа 2.114.

Пояснительная записка документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТов 2.106, 2.118 и 2.120.

Расчёт — документ, содержащий расчёты параметров и величин, например расчёт размерных цепей, расчёт на прочность и др. Выполняется в соответствии с требованиями ГОСТа 2.106.

Таблица — документ, содержащий в зависимости от его назначения соответствующие данные, сведённые в определённом структурированном виде.

Патентный формуляр — документ, содержащий сведения о патентной чистоте объекта, а также о созданных и использованных при его разработке отечественных изобретениях.

Карта технического уровня и качества продукции — документ, содержащий данные, определяющие технический уровень качества изделия и соответствие его технических и экономических показателей достижениям науки и техники. Составляется на изделие, предназначенное для самостоятельной поставки в соответствии с требованиями ГОСТа 2.116.

Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства

Подготовка производства должна проводиться в сжатые сроки при высоком качестве инженерных решений,

что ускоряет внедрение в производство новых изделий, предотвратит их моральное старение ещё в процессе создания. Одним из решений проблемы сокращения сроков проектирования и повышения качества подготовки производства является использование принципов интеграции конструкторско-технологических решений в системах автоматизированного проектирования (САПР). Внедрение САПР позволяет не только сократить трудоёмкость инженерной деятельности, но и поднять на новый качественный уровень разработку проектов.

Одной из наиболее организационно-разработанной САПР является система CAD/CAM, т.е. автоматизированное проектирование/автоматизированное управление. Система CAD/CAM объединяет несколько функциональных подсистем: PDMS — подсистема компоновочного проектирования; FAS/FDS — подсистема технологической части с формированием чертежей; QTO — подсистема расчёта потребности в материальных и трудовых ресурсах.

Система CAM включает подсистемы: AMS — подсистема управления (планирование); QA — подсистема оценки и контроля качества; SAD — подсистема документооборота с базой данных.

В связи с широким распространением САПР меняются функции подразделений конструкторских служб. Конструкторы освобождаются от трудоёмких расчётных и графических работ, сбора и подготовки информации, утомительного заполнения технологических карт. Экономический эффект от применения САПР обусловлен положительными изменениями как в сфере проектирования, так и в самом производстве. Кроме того, реально существует и дополнительный эффект при использовании изделий улучшенного качества, спроектированных в условиях САПР.

Опыт применения САПР показывает, что основными факторами, обуславливающими положительные изменения экономических показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятия, являются:

1) повышения качества проектирования за счёт использования принципиально новых методов (многовариантные расчёты, оптимизация, трёхмерные изображения, компоновочные задачи и др.), увеличение доли творческого труда инженеров, более детального анализа проектных решений на ранних стадиях, роста квалификации разработчиков;

2) сокращение сроков проектирования за счёт уменьшения времени на поисковые, расчётные и вспомогательные операции, автоматизации исполнения и исправления проектной документации и управляющих программ;

3) переход от дорогостоящих натурных испытаний к машинному моделированию ряда экспериментов;

4) автоматизация рутинных работ по выполнению вычислений, обработке графической и текстовой информации.

В сфере проектирования экономический эффект от использования САПР обусловлен прежде всего снижением затрат на подготовку производства за счёт:

- сокращения сроков выполнения работ (снижения трудоёмкости выполняемых работ);
- повышения производительности труда проектировщиков; возможного высвобождения части работников, что даёт экономию на заработной плате;
- использования на отдельных формализуемых проектных работах менее квалифицированных работников;
- сокращения числа изменений из-за ошибок в оформлении документации;
- замены ряда натурных испытаний моделированием поведения объекта проектирования в среде его функционирования (имитационное моделирование).

В отечественном машиностроении накоплен значительный опыт по созданию и использованию систем технологического проектирования производства (САПР ТП). Основными задачами, решаемыми при внедрении САПР ТП, являются: сокращение сроков разработки технологических

процессов и уменьшение стоимости работ по технологической подготовке производства.

Для функционирования САПР ТП на предприятии необходимо создать информационную базу. В условиях единичного и мелкосерийного производства номенклатура выпускаемых изделий чрезвычайно велика, поэтому предприятие постоянно находится в стадии технологической подготовки производства. Из-за большого объема работ по технологическому проектированию на изделие разрабатываются только маршрутные технологические процессы.

В крупносерийном и массовом производстве объем выпускаемых изделий достигает сотен тысяч, а период работы до очередной переналадки на выпуск нового изделия может достигать нескольких лет. В этих случаях экономически оправданы большие капиталовложения на стадии технологической подготовки производства. Например, применение дорогих методов получения заготовок, позволяющих уменьшать припуски на механическую обработку и повысить коэффициент использования материала. Кроме этого, широко используется специальное оборудование, специальный инструмент и специальная технологическая оснастка. Для решения этих задач создаются специальные подсистемы САПР.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН

1.1 ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАЧ И ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Основная задача конструктора состоит в создании машин и технических устройств, наиболее полно отвечающих запросам потребителей, дающих наибольший экономический эффект, обладающих наиболее высокими технико-экономическими и эксплуатационными показателями. Главными показателями проектируемой машины являются:

- высокая производительность и экономичность,
- прочность, надёжность, малая масса и габариты,
- энергоёмкость, металлоёмкость, высокий технический ресурс,
- степень автоматизации, простота и безопасность обслуживания,
- удобства управления, расходы на оплату работы операторов,
- объём и стоимость ремонтных работ, сборки и разборки.

Значимость каждого из перечисленных факторов зависит от функционального назначения машины:

в машинах-генераторах и преобразователях энергии на первом плане стоит величина КПД, определяющего совершенство преобразования затрачиваемой энергии в полезную;

в машинах-орудиях — производительность, чёткость и безотказность действия, степень автоматизации;

в металлорежущих станках — производительность, точность обработки, диапазон выполняемых операций;

в приборостроении — чувствительность, точность, стабильность показаний;

в транспортной технике, особенно в авиационной и ракетной, — малая масса конструкции, высокий КПД двигателя, малая масса бортового запаса топлива, безопасность.

Создание принципиально новой машины (комплекса, ряда машин) или совершенствование существующей начинается с чёткого формулирования её *функциональных признаков*, т.е. того, что должна делать машина, какую выпускать продукцию, какие осуществлять процессы и т.п. Этот вопрос может быть решён только при изучении всего комплекса операций технологического процесса или комплексов процессов, возможностей совершенствования технологии и совершенствования смежного оборудования. Например, определение функциональных признаков погрузочных машин неразрывно связаны с функциональными признаками и параметрами транспортных машин, складов, приёмных сооружений и т.п. Найти границу между средствами из разных областей техники при решении одной задачи — это один из важнейших этапов математического описания и осуществления конструкции. Выбор оптимального решения такой задачи, если можно в настоящее время говорить о таковом — это прежде всего результат творчества коллектива людей и предшествующего опыта.

Процесс совершенствования машин должен быть *непрерывным*.

Непрерывность процесса разработки в данном случае означает, что как только завершается работа над машинами одного поколения, а возможно, и раньше, формируются задачи, связанные с совершенствованием и разработкой машин нового поколения. Естественно, что постоянно учитывается опыт эксплуатации, тенденции спроса на рынке сбыта, мода на принципиальную схему, внешний вид, степень и характер автоматизации.

Новое поколение машин должно разрабатываться также непрерывно, хотя это обусловлено принципиально новыми решениями научных проблем машиностроения. Период появления новых машин и машин нового поколения не должен превышать период морального старения машин предшествующего поколения.

Принцип перераспределения функций широко используется для средств из одной и той же области техники. Речь идёт о распределении функций между системой управле-

ния, приводом, передачи движения и исполнительным устройством. Например, могут перераспределяться функции между несущими элементами, между несущей и функциональными частями конструкции. Например, функцию рамы машины могут выполнять соединённые друг с другом корпуса привода и исполнительных механизмов, роль корпуса или кожуха может быть придана выходному звену. Существенная экономия материала и уменьшение размеров получаются при *совмещении функций* — встраивании привода и (или) механизмов в барабаны, ходовые колёса, звёздочки, шкивы тормозов, т.е. в исполнительные устройства.

Принцип перераспределения функций предусматривает не только конструктивное совмещение элементов и упрощение схемы, но и обратное действие — *разделение функций*. Иногда бывает выгодно ввести дополнительные детали и элементы конструкции, которые независимо друг от друга воспринимали бы силы разного направления, разделить функции между несущими элементами, защитными кожухами и ёмкостями для смазочного материала.

Принцип выбора естественного режима и формы. В ряде случаев не следует влиять на естественный режим, естественную форму изменений конструкции под влиянием внешних воздействий, а необходимо придать этим изменениям определённый характер путём выбора схемы, коррекцией геометрии, введением различного рода компенсаторов. Простой пример: чтобы исключить вредное влияние деформаций при нагреве, можно не повышать жёсткость конструкции, а ввести в определённых местах тепловую защиту и (или) тепловые компенсаторы. Другой пример: автооператор циклового действия не нужно разгонять и тормозить с помощью привода, а целесообразно подобрать такой режим работы, чтобы он раскачивался подобно маятнику, и в определённые моменты подпитывать его энергией, компенсируя потери только на трение.

Принцип выбора естественного режима и формы непосредственно связан с *принципом самоуправляемости* — са-

моприспособляемости, адаптации к внешним условиям. Сюда относятся самоустановка звеньев механизма без избыточных связей, обусловленная погрешностями изготовления и деформациями, самоустановка двигателей транспортного средства относительно неровностей дорожного полотна или самоуправление двигателей в соответствии с различием пути при повороте (развал — сходжение), и прилегание пальцев кисти захватного устройства в соответствии с формой захватываемого предмета.

Из условий *технологичности конструкции* следует максимально унифицировать детали, сборочные единицы, отдельные блоки, использовать базовые детали и машины для различных комплексов. Определяющим критерием унификации является экономичность при изготовлении и эксплуатации.

При выборе конструктивных решений деталей массового или серийного производства следует помнить о возможности автоматизации их изготовления и сборки. Например, целесообразно так конструировать детали сборочной единицы, чтобы их можно было собрать последовательно с одной стороны без переориентации базовой детали или оборудования.

С учётом специализированного производства машины экономически выгодно предусмотреть замену крупной сборочной единицы, чем заменять и тем более восстанавливать отдельную деталь. Хотя в некоторых ситуациях возможны и исключения из этого правила.

Принцип надёжности конструкции машины обеспечивается, прежде всего, за счёт приведения конструктивных решений в соответствии с нагрузками, характером взаимодействия, возможностями материалов и т.п. Элементы конструкции должны быть рассчитаны на одинаковый ресурс. Допускается также использование деталей, ресурс которых в целое число раз меньше срока использования машины в целом. К ним относятся только легко заменяемые детали, например фильтры.

Из патентных и эстетических соображений решается вопрос о внешнем виде машины в целом и обозреваемых в

процессе эксплуатации её частей. Не следует откладывать художественную проработку машины на последние этапы конструирования. Чтобы создать композиционно-целостную и визуально завершённую конструкцию, необходима органическая связь технического и художественного проектирования. Не нужно специально украшать машину, придавать ей особые, не продиктованные необходимостью формы. Только функционально-целесообразная, правильно рассчитанная конструкция красива.

Конструктор должен учитывать известные закономерности визуального восприятия, сочетание элементов, формы и цветов и связанные с этим психологические нюансы. Без знаний закономерностей зрительного восприятия конструктор не может создать красивую машину. Не поможет ему и художник-конструктор, если не проникает в физическую суть создаваемой машины и не будет участвовать в её разработке на всём протяжении процесса конструирования. Однако никакая форма не сделает машину красивой, если не обеспечить соответствующее качество поверхности покрытий (окраски), отсутствия зазоров, расчленяющих форму; если не исключить полости, в которые набивается грязь; не исключить масляные пятна в местах уплотнений, не решить так называемые «мелочи», которые в отечественном конструировании, как правило, отодвигаются на второй план.

Пожалуй, самый главный принцип, который должен соблюдаться при конструировании, — это *приспособленность машины к человеку и к окружающей природе*. Этот принцип предусматривает обеспечение не только безопасности для жизни и здоровья человека, но и комфортабельных условий для людей, участвующих в эксплуатации машины или каким-то образом соприкасающихся с ней или окружающей её средой.

Приведённые здесь общие принципы конструирования показывают, насколько это сложный и неоднозначный процесс. Решить все проблемы в современных условиях без проведения научных исследований, без привлечения ЭВМ не

под силу самому талантливому конструктору или коллективу. Процесс автоматизации исследований, проектирования, изготовления машин представляет собой исключительно сложную задачу.

Типовая схема и стадии проектирования

Типовая схема разработки нового оборудования представляет собой последовательно-параллельную взаимосвязь основных этапов:

- анализ потребностей и спроса, определение требований смежных областей,
- изучение сферы применения и эксплуатационных условий,
- формулирование принципа действия, общее проектирование,
- синтез системы человек-машина, рабочее конструирование, технологическая проработка,
- изготовление, наладка, испытания и оценка системы человек-машина,
- доработка конструкции и технологии изготовления, комплектование и оформление технической документации.

Чтобы конструкция машины или механизма удовлетворяла высоким требованиям и имела хорошее качество, ГОСТ 2.103 устанавливает следующие стадии разработки конструкторской документации:

1. *Техническое задание*. Техническое задание составляют на основе тщательного анализа назначения проектируемого изделия и предполагаемых условий работы. Оно должно содержать: показатели, которыми характеризуется изделие (производительность, мощность, скорость, точность и т.д.); экономические требования (КПД, расход энергии, топлива и т.п.); социальные и эстетические требования (безопасность и удобство эксплуатации, современные формы, хорошая отделка и окраска и т.д.).

На этой стадии предпроектных изысканий конструктор выполняет следующую работу:

а) знакомится с аналогичными конструкциями и изучает соответствующую литературу. Это необходимо для того, чтобы не трудиться впустую над созданием изделия, ранее уже созданного и вполне оправдавшего себя. С другой стороны, знакомство с различными конструкциями аналогичного назначения ускоряет проектирование отдельных элементов;

б) выбирает основное направление разработки нового изделия;

в) определяет предварительно экономическую целенаправленность разработки нового изделия.

2. *Техническое предложение* (ГОСТ 2.118). По результатам анализа технического задания заказчика и проектных изысканий конструктор разрабатывает техническое предложение. Оно содержит:

а) выбранный из многих вариантов изделия, обладающего наперёд заданными эксплуатационными свойствами;

б) продуманную технологию производства изделия;

в) обеспечение требуемой надёжности и долговечности изделия в эксплуатации;

г) обоснование того экономического эффекта, который будет достигнут в результате внедрения изделия.

3. *Эскизный проект* (ГОСТ 2.119). Эскизное проектирование представляет собой предварительную черновую разработку общего вида изделия, его групп и основных элементов. В процесс эскизного проектирования входят:

а) установление (по возможности) базовой конструкции, которая должна быть положена в основу проектируемого изделия;

б) выбор унифицированных сборочных единиц и основных деталей;

в) разбивка изделия на самостоятельные сборочные единицы.

4. *Технический проект* (ГОСТ 2.120). При разработке технического проекта выявляют конструкцию изделия и его составных частей, определяют конструктивную форму всех деталей. На этом этапе работы решают основные вопросы технологичности заготовок, механической обработки и сборки.

Кроме этого, выполняют:

а) проектирование чертежей общих видов составных сборочных единиц изделия с округлением размеров деталей в соответствии с конструктивными соображениями, стандартами, техническими условиями;

б) проектирование чертежа общего вида машины по чертежам общих видов сборочных единиц;

в) уточнение чертежа общего вида машины и подсчёта её массы.

5. *Разработка рабочей документации*. В процессе рабочего проектирования дорабатывают все вопросы технологичности конструкции каждой детали и всего изделия в целом. В пределах этого этапа в каждой конструкторской организации установлен свой порядок проектирования в зависимости от рода проектируемых машин и сложившихся навыков работы. Общее направление работ примерно одинаково во всех конструкторских бюро и имеет такую общую схему:

а) поверочные расчёты и определение коэффициента запаса прочности в наиболее напряжённых деталях; внесение исправления и изменений в чертежи в соответствии с поверочными расчётами;

б) разработка по чертежу общего вида машины рабочих чертежей оригинальных деталей с подсчётом их массы;

в) вычерчивание сборочного чертежа по рабочим чертежам деталей и чертежу общего вида и подсчёт массы сборочных единиц;

г) технологический и нормализационный контроль рабочих чертежей.

После окончания проектирования работа по созданию машины включает в себя этапы:

1. Изготовление опытных образцов, на которых отрабатываются сборочные единицы и их детали. При этом корректируются рабочие чертежи.

2. Выпуск опытной серии и уточнение рабочих чертежей.

3. Подготовка к серийному производству изделия.

При разработке новой конструкции или модернизации существующей каждый конструктор стремится к выполнению различных производственно-технических, технологических, экономических и других требований.

Эти требования сводятся к следующему:

- увеличение срока службы деталей и изделия в целом;
- упрощение и уменьшение размеров существующей конструкции;
- целесообразное распределение сил и обеспечение восприятия их меньшими сечениями; полное использование прочностных свойств материалов;
- использование материалов с более высокими механическими качествами;
- правильный выбор исходной формы (профиля) материала, выбор формы деталей, снижающий процент отходов и припуски на обработку;
- правильное конструирование деталей с точки зрения технологичности конструкции: применение стандартизованных деталей и материалов и использование преимуществ, стандартизации и типизации; правильный выбор допусков и шероховатости поверхности отдельных деталей и всего изделия;
- конструирование изделий с учётом необходимости обеспечения простоты и дешевизны их сборки и ремонта; уменьшение объёма ручных операций;
- тщательное оформление графической документации;
- полное использование отходов производства.

Перечисленные выше требования имеют тенденцию монотонного изменения (улучшения) до достижения предель-

ного значения. Такие параметры и показатели называются *критериями развития техники*.

Наборы таких критериев развития для различных классов технических объектов в значительной степени совпадают, поэтому их обычно объединяют по определенным группам критериев (рис. 3):

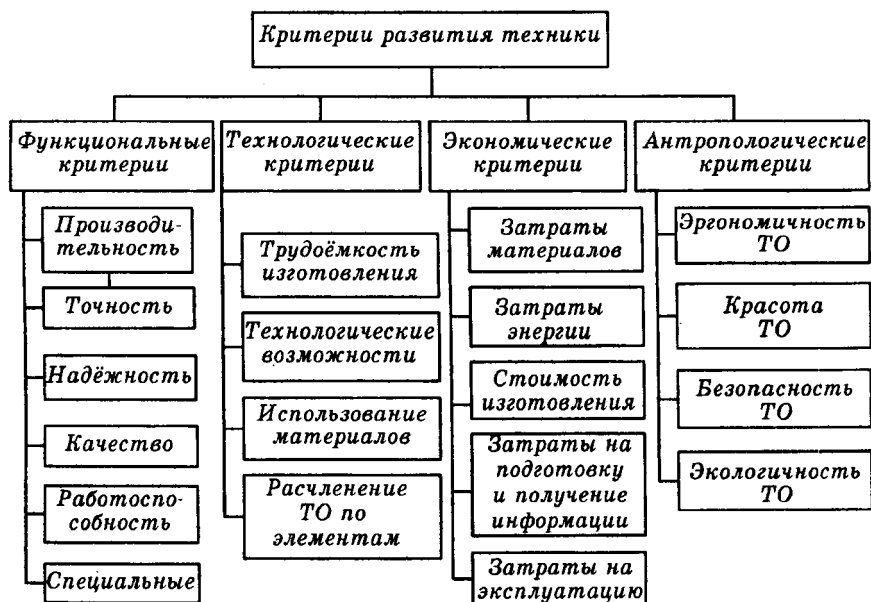


Рис. 3 Классификация критериев развития техники

- функциональные критерии, характеризующие важнейшие показатели реализации функций технического объекта;
- технологические критерии, связанные с простотой изготовления;
- экономические критерии, определяющие экономическую целесообразность реализации с помощью данного объекта;
- антропологические критерии, связанные с оценкой степени соответствия и приспособления технического

объекта к человеку (дискомфорт, степени исключения вредных и опасных воздействий, эмоциональность и воздействие положительных факторов на человека).

С учётом эксплуатационных и технико-экономических показателей определяют перечень технических параметров, в который, в частности, входят: грузоподъёмность, несущая, нагрузочная и тяговая способности, долговечность, КПД, скорость перемещений, время разгона, путь торможения, рабочее пространство, зона обслуживания, степень слежения за процессом работы и техническим состоянием машины, автоматизация управления и восстановления и др.

Экономический эффект конструкции зависит от обширного комплекса технологических, организационно-производственных и эксплуатационных факторов. В данном пособии рассмотрены только те способы повышения экономичности, которые непосредственно связаны с конструированием и зависят от деятельности конструктора.

1.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН НА БАЗЕ УНИФИКАЦИИ

Унификация представляет собой эффективный и экономичный способ создания на базе исходной модели ряда производных машин одинакового назначения, но с различными показателями мощности, производительности и т.д. или машин различного назначения, выполняющих качественно другие операции и рассчитанных на выпуск другой продукции. Унификация состоит в многократном применении в конструкции одних и тех же элементов, что способствует сокращению номенклатуры деталей и уменьшению стоимости изготовления, упрощению эксплуатации и ремонта машин.

В настоящее время существует несколько направлений решения этой задачи. Не все они являются универсальными. В большинстве случаев каждый метод применим только к определённым категориям машин, причём их экономический эффект различен.

Приведённая ниже классификация методов создания производственных унифицированных машин является условной. Некоторые из этих методов тесно взаимосвязаны; провести строгую границу между ними затруднительно. Возможно сочетание и параллельное применение двух или нескольких методов.

Секционирование

Метод секционирования заключается в разделении машины на одинаковые секции и образовании производных машин набором унифицированных секций.

Секционированию хорошо поддаются многие виды подъёмно-транспортных устройств (ленточные, скребковые, цепные конвейеры). Секционирование в данном случае сводится к построению каркаса машин из секций и составлению машин различной длины с новым несущим полотном. Особенно просто секционируются машины со звеньевым несущим полотном (ковшовые элеваторы, пластинчатые конвейеры с полотном на основе втулочных роликовых цепей), у которых длину полотна можно изменять изъятием или добавлением звеньев.

Секционированию поддаются также дисковые фильтры, пластинчатые теплообменники, центробежные, вихревые и аксиальные гидравлические насосы. В последнем случае набором секций можно получить ряд многоступенчатых насосов различного напора, унифицированных по основным рабочим органам.

Экономичность образования машин этим способом мало страдает от введения отдельных нестандартных секций, которые могут понадобиться для приспособления длины машины к местным условиям.

Метод базового агрегата

В основе этого метода лежит применение базового механизма, превращаемого в машины различного назначения присоединением к нему специального оборудования. Наибольшее применение метод имеет при создании дорожных машин, самоходных кранов, погрузчиков, укладчиков, а так-

же сельскохозяйственных машин. Базовым агрегатом в данном случае обычно является тракторное или автомобильное шасси, выпускаемое серийно.

Монтируя на шасси дополнительное оборудование, получают серию машин различного назначения. Присоединение специального оборудования требует разработки дополнительных механизмов и агрегатов — коробок отбора мощности, подъёмных и поворотных механизмов, лебёдок, реверсов, тормозов, механизмов управления, кабин, которые, в свою очередь, можно в значительной мере унифицировать.

Конвертирование

При методе конвертирования базовую машину или основные её элементы используют для создания агрегатов различного назначения, иногда близких, а иногда различных по рабочему процессу. Примером конвертирования может служить перевод поршневых двигателей внутреннего сгорания с одного вида топлива на другой, с одного вида теплового процесса на другой (с цикла искрового зажигания на цикл с воспламенением от сжатия).

Бензиновые карбюраторные двигатели легко конвертируются в газовые. Для этого достаточно замена карбюратора смесителем и изменение степени сжатия (достигаемое изменением высоты поршней) и некоторые второстепенные конструктивные переделки. В целом двигатель остаётся таким же.

Конвертирование бензинового или газового двигателя в дизель представляет более трудную задачу, главным образом ввиду присущих дизелю повышенных рабочих нагрузок, обусловленных высокой степенью сжатия и большим давлением вспышки. Следовательно, конвертируемый двигатель должен обладать значительными запасами прочности. Конвертирование в данном случае заключается в замене карбюратора топливным насосом и форсунками (или насос-форсунками), изменении степени сжатия (смена головок цилиндров, увеличение высоты поршней или изменение конфигурации их днищ).

Другим примером конвертирования является перевод работы поршневых воздушных компрессоров на другой газ (аммиак, фреон). В этом случае при переделке необходимо учитывать различие физических и химических свойств рабочих реагентов и соответственно выбирать материалы рабочих деталей. Примером конвертирования агрегатов, сильно различающихся по рабочему процессу, может служить преобразование двигателя внутреннего сгорания в поршневой компрессор. Конвертирование в данном случае включает замену головок двигателя клапанными коробками с соответствующим изменением механизма распределения и требует значительных переделок.

Компаундирование

Метод компаундирования (параллельного соединения машин или агрегатов) применяют с целью увеличения общей мощности или производительности установки. Спариваемые машины могут быть или установлены рядом как независимые агрегаты, или связаны друг с другом синхронизирующими, транспортными и другими подобными устройствами, или, наконец, конструктивно объединены в один агрегат.

Примером совмещения *первого типа* является парная установка судовых двигателей, работающих каждый на свой винт, а также установка двух или большего числа двигателей в крыльях самолёта. Помимо повышения общей мощности (при затруднительности создания двигателя большой мощности) этот способ иногда позволяет удачно решать другие задачи. Так, параллельная установка судовых двигателей увеличивает маневренность судна, особенно на малом ходу. Установка нескольких двигателей на самолёте облегчает виражирование и выруливание на земле. Применение нескольких двигателей до известной степени увеличивает также надёжность: при выходе из строя одного из двигателей можно продолжать рейс, хотя и с пониженной скоростью.

Примером совмещения *второго типа* является параллельная установка машин-орудий группами (по две-три). Её применяют в автоматических линиях, когда производитель-

ность отдельной машины, входящей в поток, значительно уступает производительности всей линии. Такая установка требует разделения потока на два или больше потоков (соответственно числу параллельно устанавливаемых машин) с последующим соединением их в один.

Примером совмещения *третьего типа* является сдвигание или страивание линейных машин-орудий, т.е. объединение нескольких рабочих трактов на общей станине. В результате получается многолинейная параллельно-поточная машина с производительностью, повышенной пропорционально числу трактов.

Агрегатирование

Агрегатирование заключается в создании машин путём сочетания унифицированных агрегатов, представляющих собой автономные узлы, устанавливаемые в различных комбинациях на общей станине.

Наиболее полное отражение этот принцип получил в конструкции агрегатных металлообрабатывающих станков. Такие станки создают на основе унифицированных блоков (силовые блоки, механизмы синхронизации, поворотные столы, корпуса общего назначения, станины, тумбы, вспомогательные узлы, системы подачи смазочно-охлаждающих жидкостей).

Большая часть изделий в процессе обработки остаётся неподвижной. К ним с разных сторон подводят соответствующим образом настроенные инструменты; операции обработки происходят одновременно, что ускоряет технологический процесс.

Основные преимущества агрегатирования: сокращение сроков и стоимости проектирования и изготовления машин, упрощение обслуживания и ремонта, возможность переналадки для обработки разнообразных деталей. Метод агрегатирования весьма перспективен. Помимо металлорежущих станков он применим для других машин-орудий.

Частичным агрегатированием является использование стандартизованных узлов и агрегатов из числа серийно выпускаемых промышленностью (редукторы, насосы, комп-

рессоры), а также заимствование с серийно изготавливаемых изделий узлов и агрегатов (коробок скоростей, механизмов переключения муфт, фрикционов и т.д.).

Метод изменения линейных размеров

При этом методе с целью получения различной производительности машин и агрегатов изменяют их длину, сохраняя форму поперечного сечения. Метод применим к ограниченному классу машин (главным образом роторных), производительность которых пропорциональна длине ротора (шестерённые и центробежные насосы, компрессоры, мешалки, вальцовочные машины и т.д.).

Степень унификации при этом методе невелика. Унифицируются только торцовые крышки корпусов и вспомогательные детали. Главный экономический выигрыш даёт сохранение основного технологического оборудования для обработки роторов и внутренних полостей корпусов. Частным случаем применения данного метода является повышение нагрузочной способности зубчатых передач за счёт увеличения длины зубьев колёс с сохранением их модуля.

Унифицированные ряды

В некоторых случаях возможно образование ряда производных машин различной мощности или производительности путём изменения числа главных рабочих органов и их применения в различных сочетаниях. Такие ряды называют семейством, гаммой или серией машин. Этот способ применим к машинам, мощность или производительность которых зависит от числа рабочих органов. Метод обеспечивает следующие технологические и эксплуатационные преимущества:

- упрощение, ускорение и удешевление процессов проектирования и изготовления;
- возможность применения высокопроизводительных методов обработки унифицированных деталей;

- уменьшение сроков доводки и освоения, опытных образцов (благодаря отработанности главных рабочих органов);
- облегчение эксплуатации: сокращение сроков подготовки обслуживающего технического персонала и сроков ремонта машин, а также упрощение снабжения запасными деталями.

Классическим примером образования унифицированных машин является создание рядов четырёхтактных двигателей внутреннего сгорания на основе унифицированной цилиндровой группы и частично унифицированной шатунно-поршневой группы. Сочетание цилиндров ограничивается условием уравновешенности сил инерции поступательно-возвратно движущихся масс и условием равномерного чередования вспышек. Удовлетворяющие этим условиям сочетания представлены в таблице 1.

Повышенной степенью унификации отличаются двухвальные двигатели (11, 12, 13, 14), у которых наряду с цилиндровой группой полностью унифицированы шатунно-поршневая группа и коленчатые валы. Так как мощность двигателя пропорциональна числу цилиндров, то представленный ряд двигателей позволяет теоретически получить семейство двигателей с очень широким диапазоном мощностей. Если мощность одного цилиндра равна, например, 73,5 кВт, то возможный диапазон ряда равен $147 \div 2205$ кВт.

Однако из всех многочисленных схем, представленных (в табл. 1), практически применяют сравнительно немногие. Двигатели с малым числом цилиндров (< 4) отличаются неравномерностью крутящего момента и плохой уравновешенностью. Двигатели с большим числом цилиндров (> 24) применяют редко из-за сложности обслуживания и увеличенной вероятности появления неполадок. Неприемлемы рядные двигатели (7–9) с малым углом развала, затрудняющим размещение всасывающих и выпускных трубопроводов между цилиндрами.

Звездообразные схемы 17–21 широко применяли для авиационных поршневых двигателей воздушного охлаждения и

сейчас используют для судовых двигателей. Другая область применения метода унифицированных рядов — роторные машины-орудия. Так как производительность роторных машин пропорциональна числу операционных блоков, установленных на машине, то из унифицированных блоков можно создать ряд машин разной пропорциональности.

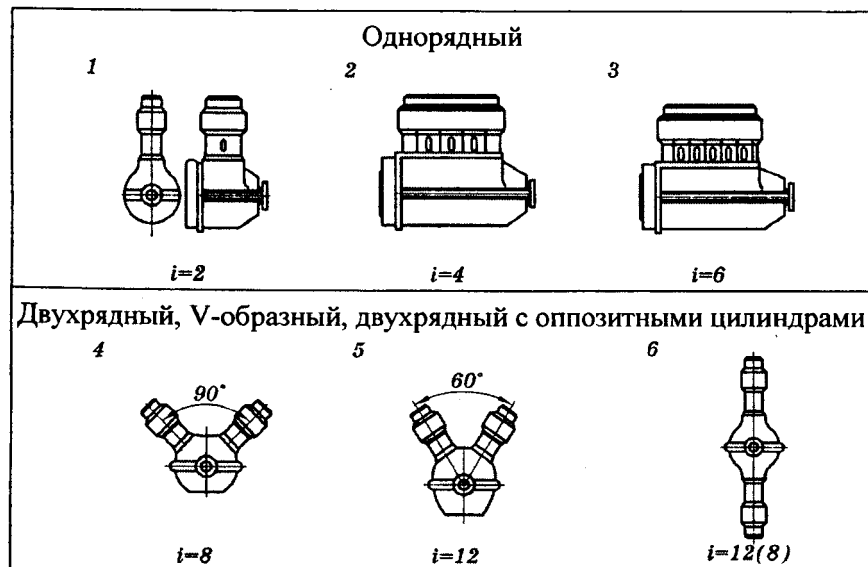
В отличие от поршневых двигателей, число блоков, которое можно установить на роторной машине, практически не ограничено и зависит только от заданной производительности.

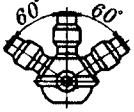
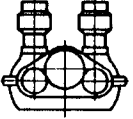
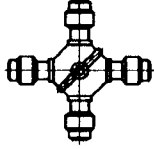
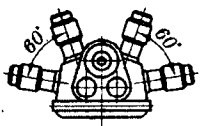
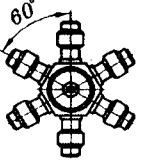
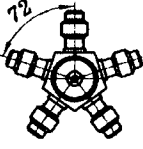
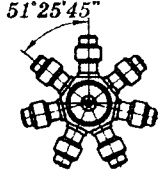
Наряду с изменением числа операционных блоков на роторных машинах можно менять блоки, приспособлявая машину к выполнению различных операций. Это пример сочетания метода унифицированных рядов с методами конвертирования или агрегатирования.

Унификация конструктивных элементов позволяет сократить номенклатуру обрабатывающего, мерительного и монтажного инструмента.

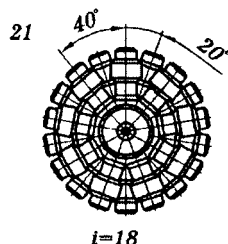
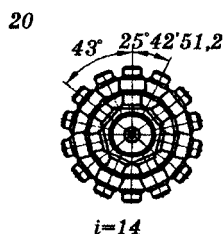
Таблица 1

Двигатели унифицированного ряда



Трёхрядный, W-образный		
7	8	9
		
$i=12$	$i=18$	$i=18$
Двухрядный двухвальный Рядный крестообразный Четырёхрядный		
12	13	14
		
$i=12(8)$	$i=24(16)$	$i=24(16)$
Четырёхрядный, X-образный		Рядный звездообразный
11	19	
		
$i=24(16)$	$i=36(24)$	
Однорядный звездообразный		
16	17	18
		
$i=3$	$i=5$	$i=7$

Двухрядный звездообразный с шахматным расположением цилиндров



Унификации подвергают посадочные сопряжения (по диаметрам, посадкам и точности размеров), резьбовые соединения (по диаметрам, типам резьб, посадкам и точности размеров, размерам под ключ), шпоночные и шлицевые соединения (по диаметрам, формам шпонок и шлицев, посадкам и точности размеров), зубчатые заземления (по модулям, типам зубьев и точности размеров), фаски и галтели (по размерам и типам) и т.д. Унификация оригинальных деталей и узлов может быть внутренней (в пределах данного изделия) и внешней (заимствование деталей с иных машин данного или смежного завода).

Наибольший экономический эффект даёт заимствование деталей серийно изготавливаемых машин, когда детали можно получить в готовом виде. Заимствование деталей машин единичного производства машин, снятых или подлежащих снятию с производства, а также находящихся в производстве на предприятиях других ведомств, когда получение деталей невозможно или затруднительно, имеет только одну положительную сторону: проверенность деталей опытом эксплуатации. Во многих случаях и это оправдывает унификацию.

Унификация марок и сортамента материалов, типоразмеров крепёжных деталей, подшипников качения и других стандартных деталей облегчает снабжение завода-изгото-

вителя и ремонтных предприятий материалами, стандартными покупными изделиями.

Степень унификации оценивают коэффициентом унификации h_{yn} , который представляют как отношение:

$$\eta_{yn} = \frac{Z_{yn}}{Z} 100\%, \quad \eta_{yn} = \frac{\sum C_{yn}}{C} 100\% \quad (1.1)$$

- числа Z_{yn} унифицированных деталей к общему числу деталей изделия,
- стоимости $\sum C_{yn}$ унифицированных деталей к стоимости изделия.

Этот коэффициент, легко определяемый на основании спецификации, суммарно характеризует совершенство конструкции со стороны сокращения номенклатуры деталей. В хороших конструкциях $\eta_n = 40 \div 60 \%$.

Для дифференцированной оценки применяют частные показатели:

степень унификации оригинальных деталей

$$\eta_{yn.op.} = 1 - \frac{N_{yn.op.}}{N_{op.}} 100\%,$$

где $N_{yn.op.}$ — число унифицированных оригинальных деталей;
 $N_{op.}$ — общее число оригинальных деталей;

степень унификации элементов конструкции

$$\eta_{эл} = 1 - \frac{N_{тр}}{N_{эл}} 100\%,$$

где $N_{тр}$ — число принятых типозамеров данных элементов;
 $N_{эл}$ — общее число данных элементов в изделии.

степень унификации крепёжных деталей

$$\eta_{эл} = \left(1 - \frac{N_{тр.кр}}{N_{кр}} \right) 100\%,$$

где $N_{тр.кр}$ — число типозамеров крепёжных деталей;
 $N_{кр}$ — общее число крепёжных деталей в изделии.

Пределы метода унификации. Методы образования производных машин и их рядов универсальными и всеобъемлющими. Каждый из них применим к ограниченной категории машин. Многие машины (водные и газовые турбины) по конструкции водных машин. Невозможно или нецелесообразно образовывать производные ряды для специализированных машин, машин большой мощности и т.д., которые остаются в категории единичного проектирования.

Этот метод применим для машин общего назначения, ограниченно применим, а иногда и вовсе не применим для машин, к габаритам и массе которых предъявляют повышенные требования. В категории машин повышенного класса нередко приходится отказываться от унификации и идти по пути единичного проектирования.

Нельзя преувеличивать роль образования производных машин и их рядов как способа удешевления машин. Эти методы по эффективности уступают другим (автоматизации и механизации производства, сокращению числа типоразмеров машин и др.).

Унификация нередко сопровождается ухудшением качества, особенно в случае производных рядов большого диапазона. Крайние члены ряда по габаритам, металлоёмкости и эксплуатационным показателям, как правило, уступают специализированным машинам. Такое ухудшение можно допустить, если унификация обеспечивает большой экономический эффект, а габариты и масса имеют второстепенное значение.

В связи с этим необходимо сказать о технологическом направлении конструирования, которое выдвигает на первый план технологическую сторону. Важно обеспечить *технологичность конструкции*. Под технологичностью понимают совокупность признаков, обеспечивающих наиболее экономичное, быстрое и производительное изготовление машин с применением прогрессивных методов обработки при одновременном повышении качества. Это также конструкторская задача.

В понятие технологичности следует ввести признаки, обеспечивающие наиболее производительную сборку изделия (технологичность сборки) и наиболее удобный и экономичный ремонт (технологичность ремонта). Технологичность зависит от масштаба и типа производства. Единичное и мелкосерийное производство предъявляют к технологичности одни требования, крупносерийное и массовое — другие. Таким образом, заслуга технологического направления заключается в обосновании органической связи между конструированием и технологией. Технологичность конструкции должна достигаться в процессе создания машины и содержаться в основном замысле и конструктивном оформлении машины.

Однако технологичность не может служить определяющим началом конструирования. Главным направлением конструирования является повышение качества машин, их надёжности и экономического эффекта. Технология должна обеспечить всеми имеющимися в её распоряжении средствами решение этих основных задач, но не диктовать направление конструирования.

1.3 МЕТОД УНИВЕРСАЛИЗАЦИИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ МАШИН. УНИВЕРСАЛИЗАЦИЯ МАШИН

Универсализация преследует цели расширения функций машин, увеличения диапазона выполняемых ими операций, расширения номенклатуры обрабатываемых деталей.

Расширить функции и области применения машин можно следующими способами: введением дополнительных рабочих органов, применением сменного оборудования, внедрением регулирования с целью увеличения номенклатуры обрабатываемых изделий, регулированием главных показателей (частоты вращения, мощности, производительности).

В качестве примера универсализации можно привести продольные строгально-фрезерные станки, совмещающие операции строгания и фрезерования, а также блюминги-

слябинги, рассчитанные на выпуск заготовок и для профильного (блюмов), и для листового (слябов) проката. Универсализация увеличивает приспособляемость машин к требованиям производства и повышает коэффициент их использования. Универсализация хорошо поддаются многие сельскохозяйственные машины. Придавая базовой машине вспомогательное навесное или прицепное оборудование, можно создать многофункциональную машину с увеличенным сезоном использования.

Главное экономическое значение универсализации заключается в том, что она позволяет сократить число объектов производства. Одна универсальная машина заменяет несколько специализированных, выполняющих отдельные операции.

В других случаях универсальные машины можно дополнить двумя-тремя специализированными машинами, предназначенными для изделий, резко отличающихся по габаритам или конфигурации от основного типа изделий. Важно определить целесообразную степень универсализации. Универсальные машины, рассчитанные на слишком большую номенклатуру изделий или диапазон операций, сложны по конструкции, громоздки и неудобны в обслуживании. Иногда целесообразнее создавать ряд машин, каждая из которых имеет умеренную степень универсализации. В целом ряд охватывает всю необходимую номенклатуру задач.

Придание машине резервов развития позволяет систематически совершенствовать машину и поддерживать её показатели на уровне возрастающих требований техники. Метод развития избавляет от необходимости периодической замены устаревающих моделей, обеспечивает на долгие годы стабильный выпуск одной конструкции, даёт большой экономический эффект и является одним из главных способов снижения стоимости машиностроительной продукции.

Резервы, закладываемые в конструкцию, зависят от назначения машины. У тепловых машин исходная модель дол-

жна обладать резервом рабочего объёма, ресурсами увеличения частоты вращения и улучшения теплового процесса. Машины-орудия, для которых на первом плане стоит производительность, должны иметь ресурсы повышения быстроходности, увеличения объёма и диапазона выполняемых операций. Совершенствование машин нередко требует последующего введения дополнительных агрегатов (редукторов, коробок скоростей, средств автоматизации). Необходимо обеспечить их установку без ломки конструкции машины, оставляя для них место и в некоторых случаях заранее предусматривая привалочные поверхности и крепёжные точки.

Во всех случаях следует обеспечить запасы прочности и жёсткости исходной модели. Это не значит, что базовая модель должна иметь большую массу. Важно усилить наиболее напряжённые детали и узлы. Огромное значение имеет рациональность силовой схемы машины, определяющая общую, присущую конструкции способность к форсированию.

Примером описываемого направления конструирования является отечественный авиационный двигатель АМ-34, который просуществовал в общей сложности 15 лет и благодаря непрерывной модернизации оставался на каждом этапе лучшим в мире авиационным двигателем своего класса. За это время мощность его была повышена с 800 до 1800 л.с. за счёт применения наддува, повышения частоты вращения, использования высокооктанового, устойчивого против детонации топлива. Срок службы возрос с 200 до 1000 ч. В результате совершенствования двигатель последней модели сохранял мощность на высотах до 6000 м. КПД винтомоторной установки был повышен в результате применения редуктора частоты вращения и винта с изменяемым шагом. Масса двигателя вследствие введения дополнительных агрегатов (нагнетателя и редуктора) несколько увеличилась; однако удельная масса снизилась почти вдвое (с 0,9 до 0,5 кг/э.л.с). Это было достигнуто за счёт запасов рабочего объёма, заложенных в исходную модель, и систематичес-

кой модернизации двигателя без изменения основной конструкции и исходных геометрических параметров.

Наряду с использованием исходных резервов следует непрерывно совершенствовать машину, пользуясь появляющимися с течением времени технологическими и конструктивными приёмами, новыми, современными материалами добиваясь снижения массы, энергоёмкости, повышения надёжности, степени автоматизации, увеличения удобства обслуживания.

Наряду с модернизацией, осуществляемой заводом-изготовителем, возможно использование резервов, заложенных в машину, в промышленности, эксплуатирующей данные машины. Металлорежущие станки с повышенной прочностью, жёсткостью и вибростойкостью оказалось возможным без переделок использовать для новых методов скоростного и силового резания. Станки малой жёсткости в новых условиях пришлось реконструировать.

Метод резервов и последовательного развития машины, в отличие от других рассмотренных выше методов снижения стоимости машиностроительной продукции, универсален и применим ко всем категориям и классам машин, в том числе и уникальным.

1.4 НАДЁЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАШИН

Основные положения теории надёжности

Надёжность (общая) — это способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя во временных пределах свои эксплуатационные показатели. Надёжность изделий обуславливается их безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью их частей. Таким образом, надёжность характеризуется комплексом показателей, которые проявляются в эксплуатации и позволяют судить о том, насколько изделие оправдывает надежды его изготовителей и потребителей.

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. *Предельное состояние* изделия характеризуется невозможностью его дальнейшей эксплуатации снижением эффективности или безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

Ремонтопригодность — приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путём технического обслуживания и ремонтов. С усложнением систем всё труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах станков поиск причины отказа может занимать более 50 % общего времени восстановления работоспособности. Поэтому облегчение поиска отказавших элементов закладывается в конструкцию новых сложных автоматических систем. Важность ремонтпригодности машин определяется огромными затратами на их ремонт в промышленности.

Сохраняемость — свойство изделия сохранять требуемые эксплуатационные показатели после установленного срока хранения и транспортирования без эксплуатации изделия. Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам, во время Второй мировой войны около 50 % радиоэлектронного оборудования и запасных частей к нему для военных нужд вышли из строя в процессе хранения.

Важным показателем безотказности является *вероятность безотказной работы*, относимая к заданному интервалу времени или заданной наработке. Для невосстанавливаемых изделий, кроме того, учитывают *интенсивность отказов*, т.е. вероятность отказа невосстанавливаемого изделия за единицу времени при условии, что отказ до этого не наступил.

Для ремонтируемых изделий пользуются также показателями:

Наработка на отказ — среднее значение наработки ремонтируемого изделия между отказами (этот показатель особенно важен для постепенных отказов); *частота отказов* (или параметр потока отказов) — среднее количество отказов ремонтируемого изделия в единицу времени для рассматриваемого момента времени (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий, но включает повторные отказы).

Для машин основным показателем долговечности является *срок службы*, т.е. календарная продолжительность эксплуатации до предельного состояния или до списания. Различают: срок службы до первого капитального или среднего ремонта, до морального износа и до списания.

Для автоматических линий и других сложных систем основным комплексным показателем надёжности является *коэффициент технического использования* — отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период к сумме этой наработки и времени всех простоев для ремонтов и технического обслуживания.

Теория надёжности находится в стадии разработки. Предметами теории являются: определение требований к надёжности с технических и экономических позиций; изучение статистических закономерностей появления отказов; выяснение причин отказов (диагностирование отказов); выявление деталей и узлов, являющихся наиболее частой причиной отказов; прогнозирование отказов; определение степени опасности отказов и сложности их устранения; изучение влияния отказов на экономику эксплуатации машин.

Прогнозируя отказы, наиболее часто встречающиеся на практике, теория может служить ценным подспорьем для машиностроителя. На долю последнего выпадает главная, активная часть задачи — устранение слабых мест конструкции и повышение её надёжности в целом. Привлекая все современные конструкторские и технологические приёмы, принципиально возможно (во всяком случае для многих категорий машин) добиться полного устранения отказов, за исключением аварийных, чисто случайных.

Пути повышения надёжности. Надёжность машин в первую очередь определяется прочностью и жёсткостью конструкции.

Рациональными способами повышения прочности, не требующими увеличения массы, являются: применение выгодных профилей и форм, максимальное использование прочности материала, по возможности равномерная нагрузка на все элементы конструкции. Целесообразные способы повышения жёсткости — правильный выбор схемы нагружения, рациональная расстановка опор, придание конструкции жёстких форм.

Непременным условием выпуска качественной продукции является прогрессивная технология изготовления, высокая культура производства, строгое соблюдение технологического режима и тщательный контроль продукции на всех стадиях изготовления, начиная с операций изготовления деталей и кончая сборкой и правильной эксплуатацией изделия.

Повышение надёжности требует длительной, повседневной, скрупулёзной, целенаправленной совместной работы конструкторов, технологов, металлургов, экспериментаторов и производственников, ведущейся по тщательно разработанному и последовательно осуществляемому плану.

Ремонтопригодность и техническое устаревание техники

Пределы повышения долговечности. Технически достижимая долговечность в значительной мере зависит от степени напряжённости эксплуатации машины. У транспортных машин долговечность составляет 10–20 тыс. часов и срок службы 5–8 лет, у стационарных, например машин-орудий, 50–100 тыс. часов, что при двухсменной работе соответствует сроку службы 15–25 лет, при трёхсменной работе — 10–20 лет. При таких сроках службы становится актуальной проблема технического устаревания.

Долговечность машины можно искусственно продлить восстановительными ремонтами. Однако этот путь экономически нецелесообразен, так как иногда расходы на восстановительные ремонты во много раз превышают первоначальную стоимость машины.

В начальный период эксплуатации ремонтные расходы невелики. Затем они скачкообразно возрастают по мере текущих и средних ремонтов и, наконец, достигают значительной величины, соизмеримой со стоимостью машины, когда она подвергается капитальному ремонту. Перед сдачей в капитальный ремонт должен быть решён вопрос о целесообразности дальнейшей эксплуатации машины.

Если оставить в стороне вопросы технического устаревания, то экономически целесообразным пределом эксплуатации следует считать момент, когда предстоящие расходы на капитальный ремонт приближаются к стоимости новой машины. Вместе с тем с течением времени закономерно снижается стоимость новых машин в связи с неуклонной интенсификацией и совершенствованием производственных процессов изготовления (кроме инфляционных процессов).

При решении вопроса о прекращении эксплуатации, кроме того, должна быть учтена суммарная стоимость всех произведённых ранее ремонтов. В качестве ориентировочного правила можно считать, что суммарные затраты на ремонт за весь срок службы машины не должны превышать её стоимости. Делают попытки нахождения оптимальной долговечности, т.е. такой, при которой себестоимость продукции машины минимальна. Исходят из следующих предпосылок.

Изменение себестоимости C_6 продукции в функции продолжительности эксплуатации выражается уравнением

$$C_6 = \varphi(H) = P_n + \frac{C}{H} + P_m, \quad (1.2)$$

где P_n — постоянные расходы,

C — стоимость машины,

H — продолжительность эксплуатации,

$P_{\text{ж}}$ — ремонтные расходы.

Себестоимость продукции равна сумме постоянных расходов (рис. 4, а, линия $C-C$), не зависящих от продолжительности эксплуатации (энергия, материалы, труд и др.), и переменных, зависящих от продолжительности эксплуатации: амортизационных расходов (кривая 1), обратно пропорциональных продолжительности эксплуатации, и годовых ремонтных расходов (кривая 2), возрастающих с увеличением продолжительности эксплуатации вследствие износа машин.

Суммирование составляющих даёт себестоимость продукции в функции продолжительной эксплуатации (жирная линия). Кривая себестоимости имеет минимум; долговечность, соответствующую этому минимуму, предлагают считать оптимальной. Трактовка эта слишком упрощена, чтобы ею можно было практически пользоваться. Во-первых, в большинстве случаев переменные расходы незначитель-

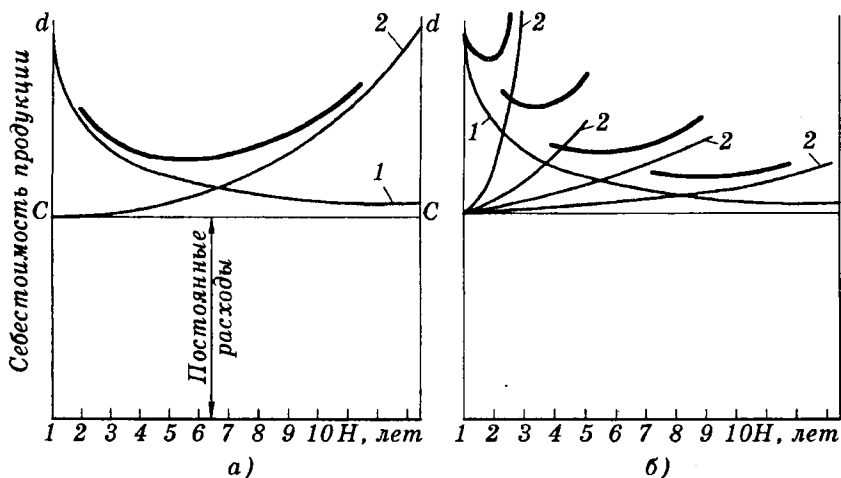


Рис. 4 Себестоимость продукции (жирные линии) в функции срока службы:

а — при $\Sigma P_{\text{ж}} = 4C$; б — при $\Sigma P_{\text{ж}} = C$

ны по сравнению с постоянными; если даже кривая себестоимости продукции имеет минимум, то он выражен слабо. Машины, превысившие срок оптимальной долговечности, могут ещё длительное время выдавать продукцию, хотя и с несколько меньшей рентабельностью.

Во-вторых, не учитывается суммарная стоимость ремонтов ΣP_x за весь период эксплуатации машины. Так, в случае, приведённом на рисунке 4, а, где ремонтные расходы в последний год эксплуатации приняты равными стоимости машины (отрезки cd), суммарные расходы на ремонт (площадь между кривой 1 ремонтных расходов и прямой c —с постоянных расходов) равны четырём стоимостям машины, что явно завышено.

При введении разумных пределов суммарной стоимости ремонтов картина меняется. Если задаться, например, условием, чтобы стоимость ремонтов не превосходила стоимость машины, то для каждого заданного срока службы получается определённый минимум себестоимости (жирные кривые рис. 4, б). С увеличением срока службы минимумы снижаются и становятся всё менее выраженными. Огибающая минимумов непрерывно падает с увеличением срока службы. Таким образом, при ограниченной известным пределом суммарной стоимости ремонтов понятие оптимальной долговечности исчезает.

Следует отметить, что рассуждения об оптимальной долговечности не учитывают динамику изменения постоянных расходов, которые не являются постоянными величинами ввиду изменения стоимости энергии, материалов и расходов на труд в результате автоматизации и совершенствования технологии. Это изменение может ещё больше усложнить картину в пользу больших сроков службы.

Долговечность и техническое устаревание

Повышение долговечности тесно связано с *проблемой технического устаревания машин*. Устаревание наступает, ког-

да машина, сохраняя физическую работоспособность, по своим показателям перестаёт удовлетворять промышленность в силу повышения требований или появления более совершенных машин. Признаками устаревания являются пониженные по сравнению со средним уровнем показатели качества продукции, точности операций, производительности, расхода энергии, стоимости труда, обслуживания и ремонтов и как общий результат — пониженная рентабельность машины.

Главным последствием устаревания является снижение роста производительности на единицу мощности, являющегося основным показателем экономического прогресса. Безусловное устаревание наступает в двух случаях: при переходе на новую продукцию (полная смена технологического процесса); при новых рабочих процессах или появлении принципиально новых конструктивных схем, позволяющих создать машины, превосходящие по показателям старые образцы. Примером устаревания последнего вида может служить переворот, произведённый в авиации появлением турбореактивных двигателей, почти полностью вытеснивших поршневые двигатели внутреннего сгорания.

Однако подобные коренные и быстропротекающие перемены происходят не часто. В условиях постепенного совершенствования техники проблема устаревания стоит иначе. Во-первых, в большинстве случаев, особенно у машин напряжённого класса, физический износ наступает задолго до технического устаревания. Например, физический ресурс грузовых автомобилей при интенсивной эксплуатации исчерпывается за 5-6 лет, тогда как по технико-экономическим показателям они могли бы полноценно работать в течение более длительного времени.

Во-вторых, существуют эффективные способы предупреждения устаревания машин. Главным из них является конструирование машин с учётом динамики развития машинопотребляющей отрасли промышленности. В конструкцию исходной модели должны быть заложены резер-

вы развития, мощности, полезной отдачи, диапазона выполняемых операций, что позволяет последовательно модернизировать машину и поддерживать её показатели на уровне возрастающих технических требований без смены основной модели и, следовательно, без ломки производства, неизбежной при переходе на выпуск новой модели. У машин, находящихся в эксплуатации, наличие резервов обеспечивает возможность их форсирования по мере роста потребностей производства.

Наиболее действенное средство предупреждения устаревания — повышение степени использования машины в эксплуатации. Чем в более короткий срок машина отрабатывает заложенный в нее ресурс долговечности, т.е. чем ближе срок службы к долговечности, тем меньше вероятность её устаревания. Сокращение срока службы до 4-5 лет практически защищает машину от устаревания.

Сокращение срока службы отнюдь не означает уменьшения продукции машины. Как будет показано ниже, суммарная отдача машины определяется не сроком службы, а продолжительностью её фактической работы, т.е. в конечном счёте долговечностью. Для технологических машин, работающих по календарному режиму, наибольшее значение имеет увеличение числа рабочих смен и повышение степени загрузки. Степень использования машин неперiodического действия, например сезонных машин, можно повысить с помощью сменного, прицепного и навесного оборудования, способствующего увеличению продолжительности их работы в году.

Быстрота и степень устаревания зависят от масштаба и технического уровня производства. На предприятиях, ускоренно наращивающих темпы производства и непрерывно совершенствующих технологический процесс, машины устаревают гораздо быстрее, чем на средних и мелких предприятиях.

Машины, устаревшие в условиях передового производства, можно использовать на менее ответственных участках или на предприятиях меньших масштабов и с меньшей

машинной оснащённостью. Важно, что они будут продолжать производство продукции до полного исчерпания механического ресурса, пусть даже с рентабельностью, несколько пониженной по сравнению со средней.

На основании изложенного можно сказать, что техническое устаревание не является безусловным пределом на пути увеличения долговечности машин. Этот предел можно или существенно отодвинуть путём рационального выбора исходных параметров машин, или практически ликвидировать путём интенсификации их использования. Следовательно, устаревание не может служить доводом против увеличения долговечности.

1.5 ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЁЖНОСТЬ МАШИН

Надёжность машины в процессе эксплуатации складывается из следующих признаков: высокая долговечность и безотказность действия, безаварийность, стабильность действия (способность длительно работать без снижения исходных параметров и выдерживать перегрузки), малый объём операций обслуживания и ухода, простота обслуживания, живучесть (способность при частичных повреждениях продолжать некоторое время работу, хотя бы на сниженных режимах), устранимость повреждений (сохранение ремонтпригодности), большие межремонтные сроки, малый объём ремонтных работ.

Из-за многообразия признаков, определяющих надёжность, установить её единый критерий затруднительно. Чаще всего при определении надёжности исходят из понятия отказа машины, т.е. любой вынужденной остановки машины. Надёжность машины характеризуют: частотой отказов; длительностью бесперебойной работы машины между отказами; закономерностью изменения частоты отказов за период службы; степенью тяжести отказов; объёмом, стоимостью и длительностью работ, необходимых для устранения отказов.

По степени тяжести отказы делят на *лёгкие, средние и тяжёлые*.

Лёгкие отказы — это мелкие неисправности, устраняемые на производстве силами обслуживающего персонала.

Средние отказы — неисправности и повреждения, требующие продолжительной остановки машины, частичной разборки, смены (или восстановления) повреждённых деталей, осуществляемой с привлечением ремонтных служб.

Тяжёлые отказы — аварии, затрагивающие жизненно важные органы машины и требующие длительной остановки на ремонт. К тяжёлым отказам можно отнести общий износ машины, требующий на определённой стадии полной переборки машины и замены износившихся деталей.

По *происхождению* различают отказы, вызванные *конструктивными и технологическими дефектами, неправильной эксплуатацией и случайные*.

Под *неправильной эксплуатацией* понимают небрежный уход за машиной, нарушение правил эксплуатации, несоблюдение установленных режимов (перегрузки), ошибки в последовательности операций управления (неправильные включения), несоблюдение техники безопасности и т.д.

Безаварийность работы и длительность межремонтных сроков во многом зависят от правильности эксплуатации, бережного отношения к машине, тщательного ухода, своевременной профилактики, предотвращения перегрузок. Но было бы неверным всецело полагаться на качество обслуживания. Условия правильной эксплуатации машины должны быть заложены в её конструкции. Необходимо обеспечить надёжную работу даже в условиях недостаточно квалифицированного обслуживания. Если машина портится в неумелых руках, это значит, что конструкция недостаточно продумана в отношении её надёжности.

Большинство отказов, приписываемых *неправильной эксплуатации*, можно с полным основанием отнести за счёт дефектов конструкции. В правильной конструкции должно

быть предотвращено использование машины на опасных перегрузочных режимах, исключена возможность неправильных включений и сведено к минимуму влияние качества ухода на надёжность машины.

Длительность вынужденных простоев машины характеризуют *коэффициентом простоев* η_{np} (иначе коэффициент неисправности), представляющим собой отношение продолжительности h_{np} простоев за определённый промежуток времени к сумме продолжительности h_{ϕ} фактической работы и h_{np} за тот же период времени:

$$\eta_{np} = \frac{h_{np}}{h_{\phi} + h_{np}}. \quad (1.3)$$

Надёжность машины можно было бы характеризовать объёмом работ по устранению отказов, т.е. в конечном счёте, показателем стоимости ремонтов, комплексно отражающим частоту и степень тяжести отказов и ремонтпригодность машин. Однако этот показатель является относительным. Во-первых, межремонтные сроки и стоимость ремонтов зависят от уровня надёжности машин, качества обслуживания и ремонтных работ.

Во-вторых, стоимость ремонтов определяется не только объёмом требуемых ремонтов, но и уровнем организованности ремонтного дела. В-третьих, суммарная стоимость ремонтов зависит от политики увеличения срока службы машин. При неправильной методике восстановления машин вместо увеличения выпуска новых машин и особенно повышения их долговечности расходы на ремонт могут быть очень значительными.

Субъективный фактор в обслуживании и управлении машиной следует по возможности исключать, а операции ухода сводить к минимуму. Устранению подлежат периодические операции регулирования, подтяжки, смазки и т.п., которые при недостаточно внимательном обслуживании могут стать причиной повышенного износа и преждевременного выхода машины из строя.

Например, в двигателях внутреннего сгорания регулирование зазоров в клапанном механизме можно устранить введением автоматических компенсаторов износа и тепловых расширений (гидравлического или иного типа). Периодическая подтяжка ослабевающих в эксплуатации гаек и болтов устраняема применением современных самоконтращихся конструкций резьбовых соединений.

Существенно усложняет эксплуатацию машин нерациональная система смазки, требующая постоянного внимания со стороны обслуживающего персонала. Периодической смазки следует, безусловно, избегать. Если этого сделать нельзя по конструктивным условиям, то необходимо применять самосмазывающиеся опоры или вводить систему централизованной подачи смазочного материала ко всем трущимся узлам с одного поста. Современное состояние смазочной техники позволяет создать подшипники, работающие практически неограниченное время при минимальном износе.

Наилучшее решение с точки зрения надёжности и удобства эксплуатации — это полностью автоматизированная система смазки, не требующая периодической смены масла. Это достижимо, если предусмотреть меры, противодействующие окислению и тепловому перерождению масла и обеспечивающие непрерывную очистку и регенерацию масла.

В системы смазки необходимо вводить аварийные устройства, обеспечивающие подачу масла, хотя бы в минимальных количествах, при выходе из строя главной системы.

Одним из приёмов увеличения эксплуатационной надёжности является дублирование обслуживающих устройств, в работе которых чаще всего случаются перебои. Примером может служить дублирование системы зажигания бензиновых двигателей и систем автоматического управления. В тех случаях, когда требуется полная безотказность действия, от которой зависит жизнь

людей (космические корабли), применяют многократное дублирование систем управления.

В комплексе мероприятий, обеспечивающих эксплуатационную надёжность машины, большую роль играет автоматическая защита от случайных или преднамеренных перегрузок предохранительными устройствами, работающими на стерегущем режиме и вступающими в действие при перегрузке машины. Наиболее целесообразна полная автоматизация управления, т.е. превращение машины в самообслуживающийся, саморегулирующийся и самонастраивающийся на оптимальный режим работы агрегат.

Примером являются самопереклюющиеся коробки передач и трансмиссии автомобиля с бесступенчатым регулированием передаточного отношения от двигателя к ходовому механизму. Система автоматически устанавливает оптимальное передаточное отношение для данных условий езды, профиля и состояния дороги, что увеличивает экономичность и повышает технический ресурс.

Доводка машин в эксплуатации. В целях создания надёжных машин необходимо тщательно изучать опыт эксплуатации. Работа конструкторских организаций над машиной не должна заканчиваться государственными испытаниями опытного образца и сдачей машины в серийное производство.

Доводка машины по существу начинается только после ввода её в эксплуатацию. Эксплуатационная проверка лучше всего позволяет обнаружить и устранить слабые места конструкции. Наблюдение за работой машины в условиях эксплуатации должно быть включено в план работы конструкторских организаций наряду с проектированием и составлять значительную часть времени работы конструктора. Недостатки машины особенно наглядно выясняются при ремонте. Поэтому обязательна тесная и непрерывная связь конструктора с ремонтными предприятиями. Заводам-изготовителям массовой и крупносерийной продукции полезно иметь собственные ремонтные подразделения как лаборатории изучения машин и школы конструирования.

Наибольшие трудности представляет объективная оценка показателей надёжности и стоимости эксплуатации. Эти показатели можно достоверно выяснить только через длительный промежуток времени, притом на продукции, вышедшей за стены завода-изготовителя и разбросанной в различных, порой отдалённых местах эксплуатации.

В этих условиях приобретают важное значение методы ускоренного определения долговечности деталей, узлов, агрегатов и машины в целом. Большую помощь могут оказать лаборатории долговечности для систематического ресурсного испытания продукции.

Следует шире применять метод моделирования эксплуатационных условий, заключающийся в стендовых или эксплуатационных испытаниях машины на форсированном режиме в условиях, заведомо более тяжёлых, чем нормальная работа машины. В этом случае машина осуществляет в сжатые сроки цикл, который при нормальной её работе длится несколько лет. Испытания проводят до наступления предельного износа или даже до полного или частичного разрушения машины, периодически их приостанавливая для замера износов, регистрации состояния деталей и определения признаков приближения аварии.

На основе изложенных теоретических положений и опыта конструирования в автомобильной и авиационной промышленности [1, 2], при создании машин рекомендуется придерживаться следующих правил:

- *омического эффекта*, определяемого в первую очередь полезной отдачей машины, её долговечностью и эксплуатационными расходами за весь период использования машины;
- добиваться максимального повышения полезной отдачи путём увеличения производительности машин и объёма выполняемых ими операций;
- конструировать машины с расчётом на безремонтную эксплуатацию с полным устранением капитальных ремонтов и с заменой восстановительных ремонтов

- комплектацией машин сменными узлами; добиваться всемерного снижения расходов на эксплуатацию машин уменьшением энергопотребления, стоимости обслуживания и ремонта;
- делать машины простыми в обслуживании; сокращать объём операций обслуживания, устранять периодические регулировки, выполнять механизмы в виде самообслуживающихся агрегатов;
 - всемерно увеличивать *долговечность* машин как средство повышения фактической численности машинного парка и увеличения их суммарной полезной отдачи; предупреждать техническое устаревание машин, обеспечивая их длительную применяемость, закладывая в них высокие исходные параметры и предусматривая резервы развития и последовательного совершенствования;
 - уменьшать стоимость изготовления машин путём придания конструкциям технологичности, унификации, стандартизации, уменьшения металлоёмкости, сокращения числа типоразмеров машин;
 - предусматривать возможность создания *производных* машин с максимальным использованием конструктивных элементов базовой машины;
 - стремиться к *сокращению числа типоразмеров* машин, добиваясь удовлетворения потребностей минимальным числом моделей путём рационального выбора параметров и повышения эксплуатационной гибкости;
 - последовательно выдерживать *принцип агрегатности*; конструировать узлы в виде независимых агрегатов, устанавливаемых на машину в собранном виде;
 - обеспечивать *максимальную технологичность* деталей, узлов и машины в целом, закладывая в конструкцию предпосылки наиболее производительного изготовления и сборки; исключать возможность неправильной сборки деталей и узлов, нуждающихся в точ-

- ной координации одного относительно другого; вводить блокировки, допускающие сборку только в нужном положении;
- устранять возможность поломок и аварий в результате неумелого или небрежного обращения с машиной; вводить блокировки, предупреждающие возможность неправильного манипулирования органами управления; максимально автоматизировать управление машиной;
 - соблюдать требования *технической эстетики*, придавая машинам стройные архитектурные формы; улучшать внешнюю отделку машин; сосредотачивать органы управления и контроля по возможности в одном месте, удобном для обзора и манипулирования;
 - делать доступными и удобными для осмотра узлы и механизмы, нуждающиеся в периодической проверке, обеспечивать *безопасность обслуживающего персонала*; предупреждать возможность несчастных случаев путём максимальной автоматизации рабочих операций, введения блокировок, применения закрытых механизмов и установки защитных ограждений;
 - *тщательно изучать опыт эксплуатации* машин и оперативно вводить в конструкцию исправления дефектов, обнаруживающихся в эксплуатации; изучение эксплуатации является лучшим средством совершенствования машин и эффективным способом повышения квалификации конструктора; предупреждать возможность *перенапряжения* машины в эксплуатации; вводить автоматические регуляторы, предохранительные и предельные устройства, исключающие возможность эксплуатации машины на опасных режимах;
 - обеспечивать конструктивный задел, подготавливая выпуск новых машин с более высокими показателями на смену устаревающим; непрерывно совершенствовать конструкцию машин, находящихся в серий-

- ном производстве, поддерживая их на уровне возрастающих требований промышленности;
- изучать *тенденции развития отраслей* народного хозяйства, использующих проектируемые машины; вести перспективное проектирование, рассчитанное на удовлетворение дальних запросов машинопотребителей.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Перечислите основные этапы конструкторской проработки изделий при проектировании. Перечислите основные типы конструкторской документации.
2. Охарактеризуйте основные принципы проектирования.
3. Какие технические характеристики изделия указываются по результатам конструкторской проработки?
4. Что представляет собой метод унификации? Как оценивается степень унификации?
5. Приведите примеры использования при проектировании метода секционирования, метода конвертирования и компаундирования, метода агрегатирования и др.
6. Какими критериями оценивается полезная отдача?
7. Какими критериями оцениваются резервы развития?
8. Что подразумевается под термином «технологичность конструкции»?
9. Перечислите основные критерии надёжности изделий.
10. Как оценивается долговечность? Как оценивается ремонтпригодность?
11. Поясните связь долговечности и технического устаревания изделий.
12. Что представляют собой критерии эксплуатационной надёжности?
13. Перечислите методы повышения эксплуатационной надёжности.

ГЛАВА 2. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

2.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Термин «стандартизация» по определению Международной организации по стандартизации (ИСО) и ГОСТ 1.0 означает *установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определённой области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон для достижения всеобщей экономии при соблюдении условий эксплуатации и требований безопасности.*

Стандартизация — это совместная творческая работа различных специалистов по установлению необходимых типов и параметров машин, механизмов, приборов, средств автоматизации, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий с учётом перспектив развития техники и народного хозяйства. Стандартизация основывается на объединённых достижениях науки, техники и передового опыта. Она определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна осуществляться неразрывно с прогрессом.

В современных условиях важнейшей особенностью стандартизации является активная роль в управлении процессом производства изделий, выражающаяся в установлении и применении обязательных норм, правил, требований, направленных на ускорение технического прогресса и СОНТ.

Государственная система стандартизации — комплекс взаимоувязанных правил и положений, определяющих цели и задачи стандартизации, организацию и методику проведения работ по стандартизации во всех отраслях народного хозяйства России, внедрения стандартов всех категорий и другой нормативно-технической документации, а также контроля за их внедрением и соблюдением.

Чтобы качество нашей продукции соответствовало требованиям международного рынка, при разработке российских

стандартов учитываются рекомендации Международной организации по стандартизации (ИСО). Стандарты в России подразделяются на следующие категории: государственные стандарты (ГОСТ); отраслевые стандарты (ОСТ); республиканские стандарты (РСТ); стандарты предприятий (СТП).

Стандарт — нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации и утверждённый компетентным органом. В зависимости от сферы действия, содержания и уровня утверждения стандарты подразделяют на категории и виды. На базе ГОСТа могут создаваться стандарты более низких уровней. В этом случае стандарт отрасли (ОСТ) является ограничением ГОСТа, а стандарт предприятия — ограничением ОСТа.

Технические условия — нормативно-технический документ, устанавливающий комплекс требований к конкретным типам, маркам, артикулам продукции. Технические условия являются неотъемлемой частью комплекта технической документации на ту продукцию, на которую они распространяются. Правила построения, изложения и оформления, порядок согласования, утверждения и государственной регистрации технических условий установлены ГОСТом 2.114.

Комплексная стандартизация — стандартизация, осуществление которой обеспечивает наиболее полное и оптимальное удовлетворение требований заинтересованных организаций и предприятий согласованием показателей взаимосвязанных компонентов, входящих в объекты стандартизации, и увязкой сроков введения в действие стандартов. Комплектность стандартизации обеспечивается разработкой программ стандартизации, охватывающих изделия, сборочные единицы, детали, полуфабрикаты, материалы, сырьё, технические средства, методы подготовки и организации производства.

Опережающая стандартизация — стандартизация, заключающаяся в установлении повышенных по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм, требований к

объектам стандартизации, которые, согласно прогнозам, будут оптимальными в последующее время.

Основная цель стандартизации — повысить эффективность общественного производства и производительность труда, в том числе инженерного и управленческого с учётом улучшения качества продукции и обеспечения его оптимального уровня и конкурентоспособности:

- обеспечить увязку требований к продукции с потребностями обороны страны; обеспечить условия для широкого развития экспорта товаров высокого качества, отвечающих требованиям мирового рынка;
- совершенствовать организацию управления производственным процессом, установить рациональную номенклатуру выпускаемой продукции;
- развивать специализацию в области проектирования и производства продукции; рационально использовать производственные фонды и экономить материальные и трудовые ресурсы;
- обеспечить охрану здоровья населения и безопасность труда работающих; развивать международное экономическое и техническое сотрудничество.

Основные задачи стандартизации: установить требования к качеству готовой продукции на основе комплексной стандартизации качественных характеристик данной продукции, а также необходимых для её изготовления сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий;

- определить единую систему показателей качества продукции, методов и средств контроля и испытаний, а также необходимый уровень надёжности в зависимости от назначения изделий и условий их эксплуатации;
- установить нормы, требования и методы в области проектирования и производства продукции, с тем чтобы обеспечить её оптимальное качество и исключить нерациональное многообразие видов, марок и типоразмеров;
- развивать унификацию промышленной продукции — важнейшего условия специализации производства, ком-

- плексной механизации и автоматизации производственных процессов, повышения уровня взаимозаменяемости, эффективности эксплуатации и ремонта изделий;
- обеспечить единство и достоверность измерений в стране, создать и совершенствовать государственные эталоны единиц физических величин, а также методы и средства измерений высшей точности;
 - установить единую систему документации, используемой в автоматизированных системах управления, установить систему классификации и кодирования технико-экономической информации, стандарты на виды носителей информации, формы и системы организации производства и технические средства научной организации труда;
 - установить единые термины и обозначения в важнейших областях науки и техники; установить систему стандартов безопасности труда; установить систему стандартов в области охраны природы;
 - установить благоприятные условия для совершенствования внешнеторговых, культурных и научно-технических связей.

В 20-е годы XX столетия, когда народ в СССР начал восстанавливать промышленность, производственники столкнулись с трудностями, вызванными разнотипностью оборудования. Дело в том, что каждое предприятие изготавливало изделия, формы и размеры которых, устанавливались конструкторами данного предприятия. В результате детали одной машины не подходили к такой же другой. Даже крепёжные детали, как болты и гайки, если их перепутывали при разборке машины, приходилось подбирать в пары, на что сборщики тратили много времени. К этому следует добавить, что слесарно-сборочный инструмент из-за разнотипности размеров (например, несоответствие размерам «под ключ» у гаек и головок болтов) также требовал долгих поисков и делал сборочный процесс малоэффективным.

Всё это приводило к удорожанию изготовления машин, и стандартизация стала насущной потребностью. В 1924 г. решением правительства СССР создаётся Бюро промышленной стандартизации Главного экономического управления Всесоюзного Совета Народного Хозяйства (ВСНХ), а 15 сентября 1925 г. был образован Комитет стандартизации при Совете Труда и Обороны. После этого начали выпускаться единые государственные (общесоюзные) стандарты ОСТ1, применение которых стало обязательным для предприятий и учреждений всего Советского Союза. Официальный характер стандартов получил своё подтверждение в постановлении ЦК и СНК СССР от 23 ноября 1929 г. «Об уголовной ответственности за выпуск недоброкачественной продукции и несоблюдение стандартов».

К концу 1932 г. в народном хозяйстве СССР насчитывалось уже около 5000 действующих стандартов, а в 1933-1937 гг. было утверждено ещё около 4600.

В 1940 г. стандартизация была передана в ведение единого органа — Всесоюзного Комитета по стандартизации при СНК СССР (ВКС). Наименование стандартов ОСТ заменяется на ГОСТ — Государственный общесоюзный стандарт.

В 1954 г. был организован Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, который с 10 ноября 1970 г. был преобразован в Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР (Госстандарт СССР). Комитет возглавлял и координировал все работы по стандартизации в стране. В Российской Федерации Госстандарт и по сей день осуществляет государственный надзор за внедрением и соблюдением на отечественных предприятиях стандартов, а также представляет Россию в международных организациях по стандартизации. Единый порядок всех работ по стандартизации в нашей стране регламентирован ГОСТом 1.0 «Государственная система стандартизации. Основные положения».

Объектами стандартизации являются: изделия основного производства (машины, инструменты, приспособления,

приборы, аппаратура и т.д.); детали, сборочные единицы, механизмы и устройства, имеющие широкое применение в машиностроении; геометрические элементы конструкторского оформления деталей и сборочных единиц (резьбы, конусы, фаски, модули, соединительные поверхности, гнёзда и т.д.); кинематические соотношения (ряды чисел оборотов, подач, передаточных отношений, направления движения и т.д.); расчётные нормативы (данные по геометрическим, кинематическим, энергетическим, силовым и комплексным расчётам) на допустимые напряжения, а также сами методы расчётов; системы допусков и посадок, геометрические формы и отклонения, кинематические соотношения и силовые параметры; материалы, применяемые в машиностроении и влияющие на качество, надёжность и долговечность готовых изделий (стали, чугуны, цветные металлы и сплавы, все виды сырья, пластмассы, химикаты, смазочные материалы, топливо, охлаждающие жидкости, литейные формовочные, сварочные и другие материалы); технологическая оснастка (инструмент, приспособления, штампы и т.д.); технологические нормативы (типовые технологические процессы, режимы резания, термическая обработка, ковочные и литейные процессы, электросварочные работы и т.д.); системы организационно-технических мероприятий по организации конструкторской, нормализационной, исследовательской, производственной работы (проектно-конструкторская, нормативно-техническая и технологическая документация); системы условных обозначений, единиц измерений и научно-технической терминологии.

2.2 СИСТЕМА ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ РОССИИ. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА СТАНДАРТИЗАЦИИ

Объектами стандартизации являются конкретная продукция, методы её производства и контроля, термины, определения и другие нормы и правила. Правила и положения, регламентирующие организационную, управленческую,

технико-экономическую и другую документацию в народном хозяйстве, составляют комплексы классифицированных межотраслевых стандартов. В настоящее время в России действуют межотраслевые системы стандартов и проводится работа по формированию нового комплекса национальных стандартов Российской национальной системы стандартов (РНСС).

Каждому комплексу (классу) присвоен цифровой индекс, который введён в обозначение стандарта. Ниже в порядке последовательности приводится цифровой индекс класса системы, наименование системы стандарта, его аббревиатура, употребляемая в технической документации, и краткая характеристика стандартов системы.

1 — Государственная система стандартизации (ГСС). ГОСТы с Р1.0 по Р1.12. Система определяет категории стандартов, объекты стандартизации, стадии разработки, порядок внедрения; основные положения о контроле за внедрением и соблюдением стандартов, порядке их оформления, изложения и пересмотра.

2 — Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Комплекс Государственных стандартов, определяющих правила и положения по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации. Основные положения — ГОСТы с 2.001 по 2.034.

3 — Единая система технологической документации (ЕСТД). Комплекс Государственных стандартов, устанавливающих единые требования к оформлению документов, применяемых при разработке технологических процессов производства машино- и приборостроения. Основные положения — ГОСТ 3.1001.

4 — Система показателей качества продукции (СПКП). Номенклатура показателей качества выпускаемых изделий. К примеру, ГОСТ 4.493 — «Материалы для средств защиты рук. Номенклатура показателей».

5 — Стандарты на аттестованную продукцию. Перечень стандартов на выпускаемую продукцию с необходимыми тех-

ническими условиями и требованиями к качеству аттестованной продукции. К примеру, ГОСТ 5.191 — «Машинки закаточно-раскаточные типа РЗМ-2 для домашнего консервирования. Требования к качеству аттестованной продукции».

6 — Унифицированные системы документации (УСД). Система стандартов охватывает организационно-распорядительную, статистическую, планово-экономическую и другие виды документации. Стандартизация направлена на сокращение объёма «бумажной работы», борьбу с излишней информацией, ненужным дублированием, на максимальное использование технических средств. Основные положения — ГОСТ 6.10.1. Общие требования и технологические операции — ГОСТ 6.38.

7 — Система стандартов по информационно-библиографической документации (СИБИД). Система стандартов на текстовые авторские и издательские документы, отчётную документацию, определяет требования к рефератам, аннотациям и другим текстовым информационным документам. К примеру, стандарт ГОСТ 7.9 — «Реферат и аннотация»; стандарт ГОСТ 7.32 — «Отчет о научно-исследовательской работе».

8 — Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Важнейшая система метрологических стандартов, относящихся к средствам измерений и комплексам эталонов — механических, электрических, оптико-физических, теплофизических, ядерно-физических и других величин. Основные положения — ГОСТ 8.383. Единицы физических величин — ГОСТ 8.417.

9 — Единая система защиты от коррозии и старения материалов и изделий (ЕСЗКС). Основные положения — ГОСТ 9.101. Стандарт ГОСТ 9.306 — «Покрытия металлические и неметаллические, неорганические» и др.

Примечание. 10, 11 — зарезервированы.

12 — Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Система содержит более 300 стандартов, разделённых на 10 подсистем: 0 — организационно-методические стандарты; 1 — стандарты требований и норм по видам опасных и

вредных производственных факторов; 2 — требования безопасности к производственному оборудованию; 3 — требования к производственным процессам; 4 — требования к средствам защиты работающих; 5-9 — резервные. Основные положения — ГОСТ 12.0.001.

13 — Репрография. Комплекс стандартов на способы, процессы и средства воспроизведения (размножения) изображений оригиналов с целью получения их копий. Основные положения — ГОСТ 13.0.001. Требования к качеству конструкторских документов, подлежащих микрофильмированию — ГОСТ 13.1.002.

14 — Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП). Её назначение — внедрение наиболее передовых, экономичных, в данных условиях, технологических процессов; максимальное использование средств автоматизации и вычислительной техники и др. Основные положения — ГОСТ 14.001. ГОСТы с 14.201 по 14.204 содержат правила обеспечения технологичности деталей и сборочных единиц.

15 — Разработка и постановка продукции на производство. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения — ГОСТ 15.000. Продукция производственно-технического назначения — ГОСТ 15.001.

17 — Система стандартов в области охраны природы и улучшения природных ресурсов. Система состоит из 9 комплексов (от 0 до 8), каждый из которых разделён на 8 групп (от 0 до 7). Основные положения — ГОСТ 17.0.0.01.

19 — Единая система программной документации (ЕСПД). Система распространяется на все виды программной документации для обработки информации на ЭВМ. Основные положения — ГОСТ 19.001.

20 — Единая система государственного управления качеством продукции. Комплексная система общих технических требований. Требования по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Номенклатура и порядок выбора — ГОСТ 20.39.108.

21 — Система проектной документации для строительства (СПДС). Система дополняет стандарты ЕСКД с учётом специфики строительства. Основные положения — ГОСТ 21.001.

22 — Обеспечение износостойкости изделий. Методы и испытания износостойкости изделий — ГОСТы с 23.201 по 23.224.

24 — Система технической документации на АСУ. Основные требования к текстовым документам, выполнению схем и чертежей, внесению измерений, учёту, хранению и обращению — ГОСТы с 24.301 по 24.402.

25 — Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Комплекс нормативно-технической и руководящей документации при расчётах и испытаниях на прочность в машиностроении. Основные положения — ГОСТ 25.001.

26 — Единая система стандартов приборостроения (ЕССП). Техническая документация и общие технические требования на средства измерения и автоматизации. К примеру, стандарт ГОСТ 26.203 «Комплексы измерительно-вычислительные. Общие требования».

27 — Система стандартов «Надёжность в технике» (ССНТ). Комплекс нормативно-технической и руководящей документации при расчётах и испытаниях на прочность в машиностроении. Система стандартов «Надёжность в технике». Основные положения — ГОСТ 27.001.

28 — Система технического обслуживания и ремонта техники. Основные положения — ГОСТ 28.001.

30 — Система стандартов эргономики и технической эстетики (ССЭТЭ). Основные положения — ГОСТ 30.001.

31 — Система стандартов технологической оснастки. Основные положения — ГОСТ 31.0000.01.

34 — Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Система стандартов касается информационной технологии. Например: стандарт ГОСТ 34.003 «Автоматизированные системы. Термины и определения»; стандарт ГОСТ 34.201 — «Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Виды, комплектность и обозначение документов автоматизированных систем».

Кроме перечисленных систем стандартов, имеются ещё системы стандартов, получающие обозначения (номера) в общей последовательности. К таким стандартам, в частности, относится система «человек—машина», рассматривающая проблему взаимоотношения человека с создаваемыми им машинами, например: стандарт ГОСТ 23000 — «Пульты управления... Общие эргономические требования»; стандарт ГОСТ 26387 — «Система «человек-машина». Термины и определения».

Сюда же можно отнести два стандарта, имеющих порядковый номер: ГОСТ 23501.101 — «Система автоматизированного проектирования. Основные положения» и ГОСТ 23501.108 — «Система автоматизированного проектирования. Классификация и обозначение».

Обратимся теперь к Единой системе конструкторской документации (ЕСКД), которая охватывает широкий круг вопросов, относящийся к конструкторской документации (КД) и имеет наибольшее применение в учебной практике. Данная система подразделена на 10 классификационных групп — от 0 до 9 (первая цифра после точки):

нулевая группа «Общие положения» — ГОСТ 2.001 и последующие;

первая группа «Основные положения» — ГОСТ 2.101 и последующие;

вторая группа «Обозначение изделий и КД» — ГОСТ 2.201;

третья группа «Общие правила обозначения чертежей» — ГОСТ 2.301 и последующие;

четвёртая группа «Правила выполнения чертежей изделий» — ГОСТ 2.401 и последующие;

пятая группа «Учёт и обращение КД» — ГОСТ 2.501 и последующие;

шестая группа «Эксплуатационная и ремонтная документация» — ГОСТ 2.601 и последующие;

седьмая группа «Правила выполнения схем» — ГОСТ 2.701 и последующие;

восьмая группа «Макетный метод проектирования» — ГОСТ 2.801; «Горная графическая документация» — ГОСТ 2.850;

девятая группа — прочие стандарты.

На рисунке 5 приведён пример обозначения стандарта ЕСКД «Правила внесения изменений» с расшифровкой цифрового кода.

Международная стандартизация

ГОСТ 2.503-90

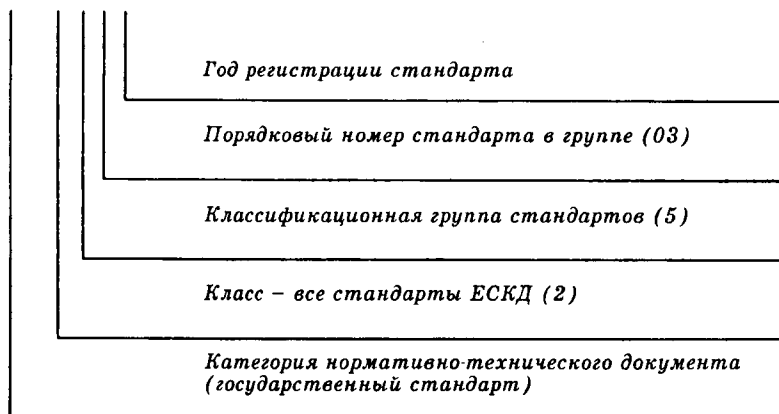


Рис. 5 *Схема обозначения стандартов ЕСКД*

Ведущее место среди международных организаций в этой области занимает Международная организация по стандартизации (International System Organization) — ISO/ ИСО. В её состав входят национальные организации по стандартизации 81 страны, представляющие все пять континентов мира.

Высшим руководящим органом ИСО является Генеральная ассамблея, которая созывается раз в три года. Практической работой всей организации руководит Совет, состоящий из представителей 18 стран-членов, и Исполнительный комитет Совета, состоящий из представителей семи стран-членов, избираемых Советом ИСО.

Главной целью ИСО, как определено уставом этой организации, является содействие развитию стандартизации в мировом масштабе для обеспечения международного товарообмена и взаимопомощи, а также для расширения сотрудничества в области интеллектуальной, научной, технической и экономической деятельности. Деятельность ИСО по созданию международных стандартов осуществляется в 1630 технических органах (технические комитеты, подкомитеты, рабочие группы) и охватывает практически все области промышленности и сельского хозяйства. Исключения составляют работы по стандартизации в области электроники, электротехники и связи, которыми занимается Международная электротехническая комиссия — МЭК.

К настоящему времени техническими органами ИСО разработано около 3500 международных стандартов. Комитет ИСО по изучению научных принципов стандартизации (СТАКО) занимается следующими вопросами:

- построение и классификация международных стандартов и их взаимосвязь с национальными и региональными стандартами;
- разработка научных принципов международной стандартизации;
- определение методов оценки степени использования международных стандартов в национальной практике стран — членов ИСО;
- разработка и согласование определений и терминов, относящихся к деятельности в области стандартизации;
- разработка руководств по организации обучения и переподготовке специалистов в области стандартизации.

Одной из старейших научно-технических организаций по международному сотрудничеству является Международная электротехническая комиссия — МЭК, созданная в 1906 г. Руководящими органами являются Совет, в котором представлены главы всех национальных комитетов, и Комитет действия, состоящий из 12 национальных комитетов. Со-

ветский Союз стал членом МЭК в 1921 г. В Госстандарте учреждён Российский комитет по участию в МЭК.

Деятельность МЭК охватывает широкий круг вопросов. Работа по созданию стандартов осуществляется в 78 технических комитетах и 110 подкомитетах МЭК, которые можно условно подразделить на следующие группы: электро-энергетическое и электротехническое оборудование, электронная техника, радиоаппаратура, измерительная техника (электрические измерительные приборы и счётчики, электронное приборостроение, ядерное приборостроение), электротехническая и электронная бытовая аппаратура, судовая аппаратура, электрооборудование станков, электромедицинские приборы, приборы для управления промышленными процессами и др.

МЭК уделяет особое внимание вопросам качества продукции. Это привело к учреждению в 1976 г. Международной системы сертификации изделий электронной техники, основанной на стандартах МЭК. Цель системы — обеспечение поставок на мировой рынок изделий электронной техники гарантированного качества на базе их соответствия требованиям стандартов МЭК и применения единой методики оценки качества.

Наряду с указанными существуют другие международные организации, занимающиеся проблемами стандартизации, метрологии и управления качеством продукции. Это такие организации, как Европейская организация по контролю качества — ЕОКК, Международная организация законодательной метрологии — МОЗМ, Международное бюро мер и весов и др.

МОЗМ призвана обеспечивать единство измерений в международном масштабе, что необходимо для достижения сопоставимости результатов научных исследований, проводимых в разных странах, для установления единообразных значений и характеристик свойств и составов веществ и материалов, и технических характеристик изделий, а также для развития международной торговли.

Основная задача ЕОКК — совершенствование и пропаганда методов контроля и управления качеством продукции в целях его повышения, снижения себестоимости изделий и увеличения производительности труда.

Россия (как и прежде СССР) является постоянным членом руководящих органов ИСО — Совета и Исполкома, участвует в работе постоянных комитетов Совета. Россия принимает также активное участие в работе 123 технических комитетов ИСО. Руководство работой в России по международной стандартизации осуществляет Госстандарт.

Россия является активным членом МОЗМ и ЕОКК. Работы по международной стандартизации позволяют использовать научно-технический и производственный опыт развитых стран, содействуют взаимному обмену информацией в этой области и способствуют ускорению технического прогресса в странах, участвующих в международных организациях.

Выступая на Генеральной Ассамблее по стандартизации, президенты ИСО и МЭК отметили: «Будущее всемирного информационного общества с его «информационными супермагистралями» будет зависеть от уровня международной стандартизации, которая ныне охватывает такие аспекты, как открытые сети и сжатие аудио- и видеоинформации для устройств информационной техники и её использования в телекоммуникациях».

2.3 ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ. АГРЕГАТИРОВАНИЕ

Ряды предпочтительных чисел

Стандартизация — есть регламентирование конструкции и типоразмеров широко применяемых машиностроительных деталей, узлов и агрегатов.

Основой стандартизации являются ряды чисел, подчиняющихся определённым закономерностям. В арифметических

рядах каждый член образуется прибавлением к предыдущему члену постоянного числа (разность прогрессии) τ .

Величина любого члена ряда $\alpha_k = \alpha_0 + k \cdot \tau$, где k — порядковый номер члена; α_0 — первый член ряда (присваивается нулевой номер). На рисунке 6, а показаны арифметические ряды $\alpha_0 = 10$, $\tau = 10 \div 1$ в диапазоне $k = 0 \div 30$. При $\tau = 5$ арифметический ряд в диапазоне наиболее употребительных в машиностроении диаметров $D = 10 \div 100$ мм имеет следующий вид:

10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70;.... 100.

Арифметические ряды отличаются относительной неравномерностью. Их верхние области больше насыщены градациями размеров, а нижние — меньше. Отношение каждого члена ряда к предыдущему имеет большое значение для первых членов ряда и резко уменьшается в верхних областях ряда.

Неравномерность можно отчасти исправить изменением величины τ для различных областей ряда. Так, для приведённого выше ряда в диапазонах $D < 20$, $D = 20 + 50$ и $D = 50 + 100$ мм можно принять соответственно $\tau = 2,5$; 5 и 10. Тогда получается ряд 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 70; 80; 90; 100 с более равномерной градацией размеров.

В рядах, построенных по принципу геометрической прогрессии, каждый член ряда получается умножением предыдущего члена на постоянную величину φ (знаменатель прогрессии). Любой член ряда $\alpha_k = \alpha_0 \cdot \varphi^k$, где k — порядковый номер члена, α_0 — первый член ряда (присваивают нулевой номер).

Основные ряды. ГОСТ 8032 устанавливает пять рядов предпочтительных чисел со знаменателем прогрессии

$\varphi = \sqrt[3]{10}$. Степени n корня приняты равными 5, 10, 20, 40 и 80. Эти числа вместе с буквой R составляют обозначение ряда: R5, R10 и т.д., которые называют основными. С уменьшением φ интервалы между членами ряда уменьша-

ются, число членов ряда возрастает; ряд получается более дробным (рис. 6, б).

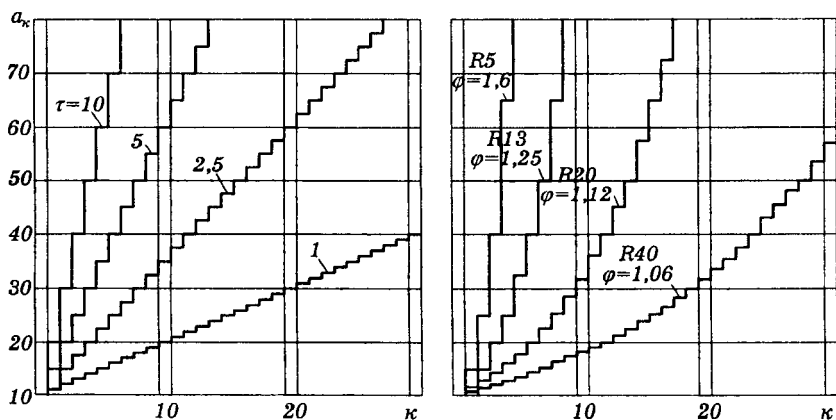


Рис. 6 Арифметические (а) и геометрические (б) ряды (k — порядковый номер членов ряда)

Производные ряды. Из основных рядов можно получить геометрические ряды для любого диапазона чисел, т.е. с любым значением начального и конечного членов. В соответствии с основным законом образования геометрических прогрессий производные ряды получают умножением первого члена нового ряда на числа любого из основного ряда (R5, R10 и т.д.). Для примера приводим производный ряд с диапазоном 1 — 1000 на основе ряда R5: 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000.

Ряды на основе геометрической прогрессии можно разделить путем отбора m -х членов (m — порядковый номер, кратный любому целому числу). В результате образуется новый ряд со знаменателем φ^m . Примером такого разрежения являются основные ряды предпочтительных чисел.

Ряды R20 ($\varphi^m = 1,06^2 = 1,12$), R10 ($\varphi^m = 1,06^4 = 1,25$), R5 ($\varphi^m = 1,06^8 = 1,6$) получают отбором из ряда R40 ($\varphi^m = 1,06$) всех членов с порядковыми номерами, кратными соответственно 2, 4, 8. Отбором из ряда R40 членов с порядковыми

номерами, кратными 3, 6, 9, можно получить соответственные ряды со знаменателями:

$$\varphi^m = 1,06^3 = 1,19; \varphi^m = 1,06^6 = 1,41; \varphi^m = 1,06^9 = 1,68.$$

Ряды предпочтительных чисел при конструировании

Ряды предпочтительных чисел целесообразно использовать в случаях, когда требуется создавать ряд градаций какого-либо параметра с равномерной насыщенностью градаций во всех частях ряда (например, передаточных отношений в коробках передач и подач металлорежущих станков). Однако равномерное распределение градаций не всегда является наиболее рациональным. Правильнее при нормировании технических параметров исходить из плотности распределения применимости данного параметра.

В качестве примера на рисунке 7 приведён график применимости модулей зубьев зубчатых колёс в общем машиностроении. Как видно, 90 % всех применяемых колёс име-

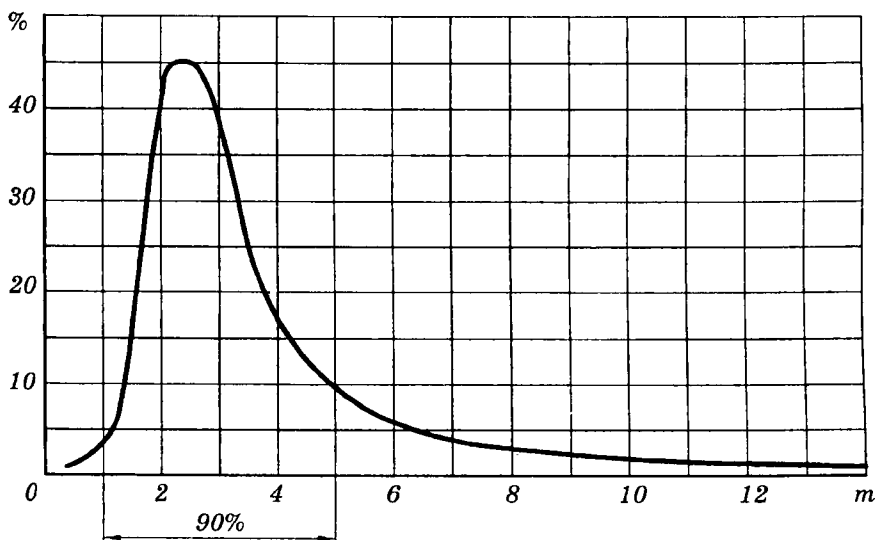


Рис. 7 Применяемость модулей зубьев в машиностроении

ют модуль в пределах $m = 1 \div 5$ мм. Максимум применяемости приходится на колёса с модулем $2 \div 3$ мм. В данном случае целесообразно увеличить число градаций в области наибольшей применяемости и сократить число градаций для редко применяемых модулей. В других отраслях машиностроения (приборостроение, тяжёлое машиностроение) соотношения могут быть иными. В каждой отрасли можно установить плотность распределения применяемости и соответственно выбрать градации стандартных модулей. Такой же дифференцированный подход, в сущности, необходим и для других нормируемых в машиностроении параметров (размеры посадочных диаметров, резьб и др.).

Значение рядов предпочтительных чисел для конструирования не следует переоценивать. Некоторые конструкторы считают необходимым применять ряды предпочтительных чисел для стандартизации и для всех областей конструирования, что неверно.

Параметрические ряды

Параметрическими называют ряды машин одинакового назначения с регламентированными конструкцией показателями и градациями показателей. Во многих случаях целесообразно положить в основу ряда единый тип машины, получая необходимые градации изменением её размеров при сохранении геометрического подобия модификаций ряда. Такие ряды называют размерно-подобными или просто размерными.

В других случаях целесообразно установить для каждой градации свой тип машин со своими размерами. Такие ряды называют типоразмерными. В смешанных рядах одни модификации ряда делают однотипными и геометрически подобными, другие создают на основе иных типов.

Примером могут служить судовые двигатели. При малых мощностях целесообразно применять четырёхтактные двигатели внутреннего сгорания; при средних и больших

мощностях — двухтактные, обладающие при равной мощности меньшими габаритами и массой, или газотурбинные, способные к ещё большей концентрации мощности.

Метод параметрических рядов даёт наибольший эффект в случае машин массового применения, имеющих большой диапазон изменения показателей. Экономический эффект параметрических рядов обусловлен сокращением числа моделей. Технологическим выигрышем является централизованное, а следовательно, производительное изготовление машин, обусловленное увеличением масштаба выпуска каждой модели.

Главное значение при проектировании параметрических рядов имеет правильный выбор типа машин, числа членов ряда и интервалов между ними. При решении этих вопросов необходимо учитывать степень применимости различных членов ряда, вероятные в эксплуатации режимы работы, степень гибкости и приспособляемости машин, возможности их модифицирования и т.п.

В диапазоне наиболее часто применяемых параметров целесообразно увеличивать число членов ряда; в диапазоне редко применяемых — расширять интервалы между членами ряда. Одним из главных условий реализации экономического эффекта параметрических рядов является длительность их применения. Поэтому при проектировании параметрического ряда следует учитывать современное состояние и перспективы развития машино-потребляющих отраслей народного хозяйства.

Размерно-подобные параметрические ряды

Показатели параметрического размерно-подобного ряда машин зависят от геометрических размеров машины и от параметров рабочих процессов.

Для сохранения полного подобия машин различных размеров необходимо соблюсти, во-первых, геометрическое подобие (рис. 8), а во-вторых, подобие рабочего процесса, т.е. обеспечить одинаковость параметров энергетической и си-

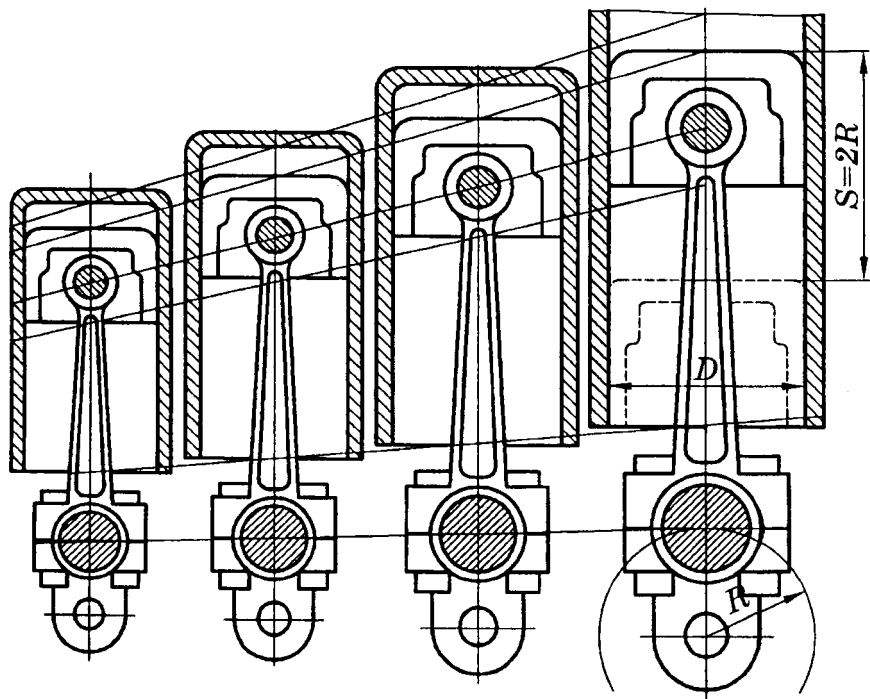


Рис. 8 *Размерно-подобный ряд поршневых двигателей*

ловой напряжённости машин в целом. Критерии подобия разработаны для большинства типов машин и рабочих процессов. Например, для двигателей внутреннего сгорания главные условия подобия:

- равенство среднего эффективного давления P_e , зависящего от давления и температуры смеси на всасывании;
- равенство средней скорости поршня

$$V = \frac{S \cdot n}{30}, \quad (2.1)$$

где S — ход поршня;

n — частота вращения коленчатого вала или, что тоже самое, равенство произведения $Dn = \text{Const}$ (D — диаметр

цилиндра, связанный с ходом поршня в геометрически подобных двигателях соотношением $S/D = \text{const}$).

В обобщённом виде

$$\varphi(P_c, Dn) = \text{Const}. \quad (2.2)$$

Если этот критерий одинаков, то у всех геометрически подобных двигателей одинаковы термодинамический, механический и эффективный КПД (следовательно, и удельный расход топлива), тепловая напряжённость (теплоперепад на единицу охлаждающей поверхности), удельная мощность, удельные нагрузки на подшипники, конструкционная масса двигателя (масса, отнесённая к сумме квадратов диаметра цилиндра).

Следует отметить, что строгое соблюдение геометрического подобия в области малых значений диаметра неосуществимо по условиям изготовления. Минимальные сечения деталей ограничены условиями обеспечения достаточной жёсткости при изготовлении (сопротивляемость силам резания), монтаже и транспортировании. Поэтому многие детали малых машин ряда приходится делать более массивными, чем того требуют условия геометрического подобия. Вследствие этого двигатели с малыми размерами цилиндров имеют повышенную удельную массу, но вместе с тем большую степень надёжности, повышенную прочность и жёсткость, способность к форсированию наддувом и повышением частоты вращения.

Рассмотренный пример двигателей внутреннего сгорания представляет собой частный случай обширной категории машин, напряжённость деталей которых зависит от рабочих давлений и скоростей, т.е. от параметров рабочего процесса. Общую закономерность для машин этого класса можно сформулировать следующим образом: напряжения в геометрически подобных конструкциях, работающих при одинаковых давлениях и рабочих скоростях, одинаковы.

Следует учитывать неизбежное у геометрически подобных машин изменение удельных показателей (например, литровой мощности у двигателей), а также изменение механических показателей (например, жёсткости на изгиб).

Из предыдущего анализа вытекает следующий вывод.

Размерно-подобные ряды надо строить на основе главных характеристик (мощности, производительности и т.д.), а не геометрических параметров, так как в силу внутренних законов подобия главные характеристики располагаются по закономерности, отличной от закономерности изменения геометрических характеристик. Последние получаются как производные.

Нормальные линейные размеры. Агрегатирование

На базе основных рядов разработаны ряды нормальных линейных размеров (ГОСТ 6636) с несколько большим округлением чисел по сравнению с основными. В отличие от основных, ряды нормальных размеров обозначают буквами Ra 5, Ra10 и т.д.

ГОСТ 6636 охватывает линейные размеры в интервале 0,001—20000 мм (см. Приложение 1). Применение стандартных линейных размеров целесообразно для поверхностей, подвергаемых точной механической обработке, особенно для посадочных поверхностей, что способствует стандартизации режущего, контрольного и мерительного инструмента и облегчает настройку станков.

Главный экономический выигрыш получается при сокращении числа членов рядов, т.е. применении в каждом отдельном случае наиболее низкого ряда, обеспечивающего нужный диапазон размеров и, следовательно, сокращение номенклатуры инструмента. Меньшее значение имеют нормальные размеры для поверхностей, не нуждающихся в точной координации.

На основании нормальных линейных размеров устанавливают ряды диаметров проволоки, прутков, толщины листового проката, линейных размеров сечений фасонного проката. Применять стандартные ряды для осевых размеров и для размеров необрабатываемых поверхностей (литьё, штамповка) нерационально. В этих случаях даже частичная стан-

дартизация размеров, не давая никаких реальных преимуществ, только усложняет процесс проектирования и изготовления деталей.

Почти в каждой специализированной проектной организации стандартизируют типовые для данной отрасли машиностроения детали и узлы. Из стандартных деталей, унифицированных узлов и покупного оборудования можно компоновать аппараты:

- с одинаковым рабочим процессом, но с различными размерами и производительностью;
- одинакового назначения, но с различными параметрами рабочего процесса (давление, вакуум, температура);
- различного назначения и с разным рабочим процессом.

Преимущества стандартизации реализуются в полной мере при централизованном изготовлении стандартных изделий на специализированных заводах. Это разгружает машиностроительные заводы от трудоёмкой работы изготовления стандартных изделий и упрощает снабжение ремонтных предприятий запасными частями.

Степень стандартизации оценивают коэффициентом

$$\eta_c = \frac{N_c}{N} 100\%,$$

где N_c — число стандартных деталей;

N — общее число деталей в изделии.

Ряды предпочтительных чисел неприменимы для создания унифицированных рядов машин с повторяющимися рабочими органами. Параметры унифицированных рядов складываются по другим законам, зависящим от реальных возможностей сочетания унифицированных органов и условий технической применимости членов ряда, и не могут уложиться в геометрическую прогрессию.

Неприменимы ряды предпочтительных чисел и для определения параметров прогрессивно развиваемых и модер-

низируемых машин, параметры которых на каждой стадии зависят от технических возможностей и потребностей соответствующих отраслей народного хозяйства. Так, мощность тепловых машин зависит от их начальных параметров (давления и температуры) и частоты вращения. Ни один из этих параметров невозможно произвольно увеличить без ухудшения показателей машины. Увеличение температуры и частоты вращения возможно только на базе технических усовершенствований (повышения жаропрочности материалов, улучшения охлаждения термически напряжённых деталей). Результаты этих работ невозможно уложить в ряды предпочтительных чисел.

Общий вывод состоит в том, что параметры стандартных элементов следует выбирать не на основе априорных закономерностей, а исходя из конкретных условий их применимости.

Нельзя согласиться с распространённым среди конструкторов (особенно конструкторов творческого склада) пренебрежительным отношением к стандартам. Стандартизация является существенным фактором снижения себестоимости машин и ускорения проектирования. Однако непременным условием является высокое качество стандартов, непрерывное их совершенствование. Применение стандартов не должно стеснять творческую инициативу конструктора и препятствовать поискам новых, более рациональных конструктивных решений. При конструировании машин не следует останавливаться перед применением новых решений в областях, охватываемых стандартами, если эти решения имеют явное преимущество.

Агрегатирование — это принцип создания машин, оборудования, приборов и других изделий из унифицированных многократно используемых стандартных агрегатов (автономных улов), устанавливаемых в изделия в различном количестве и различных комбинациях.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что при частой сменяемости или модернизации изготавливаемых из-

делий агрегатирование является наиболее прогрессивным методом конструирования, обеспечивающим ускорение технического прогресса и дающим большой экономический эффект⁴ в народном хозяйстве. В настоящее время на предприятиях работают сотни автоматических линий и станков, собранных из унифицированных агрегатов.

На рисунке 9 приведены унифицированные агрегаты станка: 1 — насадки, 2 — силовая головка, 3 — кронштейны, 4 — электрошкаф, 5 — делительный стол, 6 — станина, 7 — пульт управления, 8 — основание, 9 — ось, 10 — бапмаки, 11 — промежуточные плиты и одна из впервые созданных схем компоновки агрегатного станка. На круглой станине устанавливается несколько силовых головок. Присоединяя к головкам соответствующие технологические насадки, на таком агрегатном станке можно производить различные механические операции по обработке металлов и других материалов: обточку, сверлильно-расточные, резьбонарезные, фрезерные и др. Производительность агрегатных станков в несколько раз выше, чем универсальных, а достижимая точность обработки — IT7... IT9.

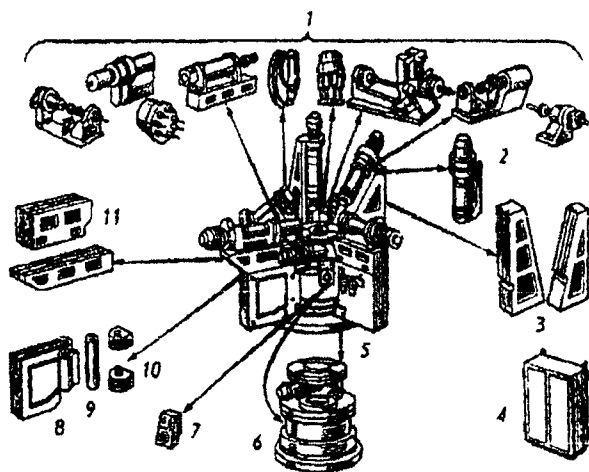


Рис. 9 Унифицированные агрегаты металлорежущего станка

2.4 ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И ТОЧНОСТЬ

Представьте себе, что во время работы какой-то машины изнасилась или сломалась деталь. Что делать? Изготовить её своими силами? Это потребует много времени, да и не всегда возможно в силу целого ряда причин. Проще взять со склада запасную деталь и заменить ею вышедшую из строя. Конечно, новая деталь должна по своим размерам и форме точно соответствовать заменяемой, иначе пришлось бы потратить много времени на её подгонку. Такая несложная замена стала возможной в современном массовом производстве машин благодаря применению принципа взаимозаменяемости.

Принцип обеспечения взаимозаменяемости заключается в изготовлении деталей и сборке изделий с допустимой (расчётной) точностью их геометрических, механических, физических и других параметров. Взаимозаменяемость предполагает, что любые две сопряжённые детали могут быть соединены без всякой подгонки. Свойством взаимозаменяемости могут обладать не только отдельные детали, но и сборочные единицы, агрегаты и машины. Благодаря этому создаётся возможность организовать парк запасных изделий, а это помогает обоснованно установить возможную долговечность и надёжность машины, механизма в целом.

В машиностроении взаимозаменяемость является основным свойством совокупности изделий, определяющим качество продукции. Свойствами, определяющими качество отдельных изделий, являются точность, надёжность, долговечность и др. (рис. 10).

Основным условием взаимозаменяемости является изготовление деталей с определённой точностью в пределах заранее установленных допустимых отклонений от расчётных размеров и формы. Что же такое точность?

Точность — это степень приближения фактического размера к размеру, указанному на чертеже детали. Чем ближе эти размеры, тем выше достигнутая точность. Но получить высокую точность даже после самой тщательной механи-

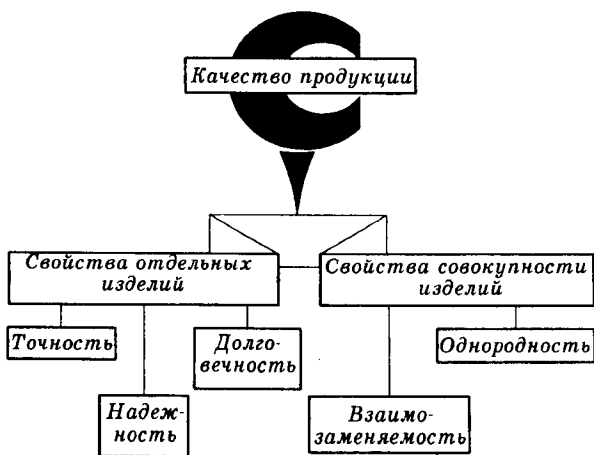


Рис. 10 Составляющие показатели качества изделий машиностроения

ческой обработки детали не так-то легко, а получить абсолютную, идеальную точность вообще невозможно.

Во-первых, само оборудование, на котором вы работаете, имеет неточности, передающиеся на обрабатываемую деталь.

Во-вторых, инструмент, изнашиваясь в процессе работы, приводит к отклонению от заданных размеров.

В-третьих, обрабатываемая деталь в процессе обработки деформируется и нагревается.

В-четвёртых, происходят ошибки в измерениях из-за неточности измерительного инструмента, влияния на него температуры, из-за неправильного пользования им. Поэтому, даже если измерительный прибор показывает абсолютно точный размер, действительный размер отличается на величину ошибки изготовления самого прибора.

В-пятых, допускаются ошибки самим рабочим и т.д.

В любой современной машине и даже в измерительных приборах далеко не все поверхности деталей требуют высокой точности обработки. Качество работы машин от этого не снижается. Например, для наружных поверхностей ру-

кояток управления у металлообрабатывающих станков, для маховиков у трубопроводной арматуры и т.д. точная обработка совсем не нужна. Вполне достаточно, если их удобно охватывать рукой при регулировании рабочих процессов.

Обычно точная обработка бывает необходима для тех поверхностей, которые сопрягаются с поверхностями других деталей машины или механизма. К таким относятся, например, наружная поверхность цапфы вала и поверхность отверстия зубчатого колеса или шкива, наружная поверхность поршня и внутренняя поверхность цилиндра в двигателях, шпонка и шпоночный паз и др. Требуемая точность обработки поверхности зависит от назначения детали, её роли в работе машины и от характера соединения поверхностей.

Если в машине износилась или сломалась деталь, её заменяют новой, запасной, и она встаёт на место прежней так, будто заранее была пригнана к этой машине. Достигается это изготовлением взаимозаменяемых деталей, отдельных сборочных единиц и целых машин и механизмов. Использование принципа взаимозаменяемости деталей стало возможным только благодаря высокой точности обработки и не менее точным способам измерения, достигнутым в наше время. Так что же такое взаимозаменяемость?

Взаимозаменяемостью называется свойство независимо изготовленных с заданной точностью изделий обеспечивать возможность беспригоночной сборки (или замены при ремонте) сопрягаемых деталей в сборочную единицу, а сборочных единиц — в изделие при соблюдении предъявляемых к ним технических требований.

Применение принципа взаимозаменяемости при конструировании ведёт к повышению качества и снижению себестоимости конструкции. Основан принцип на стандартизации и унификации (объединении в группы) типоразмеров, на целесообразной точности элементов конструкции и др.

Она может быть внешней, когда сборка производится без подгонки, только по присоединительным размерам, и внутренней, когда все элементы, входящие в изделие, ха-

рактизуются этим свойством. Взаимозаменяемость может быть полной, когда требуемые эксплуатационные свойства, в частности точность, сохраняются у всех изделий, а также — неполной, когда такое свойство присуще только заранее обусловленной части изделий.

Детали и сборочные единицы взаимозаменяемы только тогда, когда их размеры, форма, физические свойства материалов и другие количественные и качественные характеристики находятся в заданных пределах.

Функциональная взаимозаменяемость распространяется на конструирование (машин, приборов, их составных частей); изготовление (производство заготовок, обработку деталей, сборку и пр.); контроль и измерение (деталей, сборочных единиц, механизмов, систем, входных и выходных параметров изделий в процессе производства и эксплуатации); эксплуатацию (обеспечение надёжности, долговечности, точности и других функциональных показателей в процессе эксплуатации).

Функциональными названы параметры, которые влияют на эксплуатационные показатели работы изделия, сборочной единицы или детали. Эти параметры называют так, чтобы подчеркнуть их связь со служебными функциями (функционализированием) деталей, сборочных единиц и машин.

Взаимозаменяемость зависит от точности изготовления деталей на производстве, а это в свою очередь требует соответствующего по точности инструмента, оборудования и средств контроля, а также высокой квалификации рабочих. Какой должна быть точность изготовления деталей, указывают на чертежах допустимыми предельными отклонениями, которые регламентируются обязательными стандартными системами и техническими требованиями.

Разумеется, не каждую деталь и даже не все её части необходимо обрабатывать с одной степенью точности. Требуемая точность обработки той или иной поверхности зависит от назначения детали, её роли в работе машины и характера соединения её поверхности с поверхностями других деталей.

Взаимозаменяемость — основа современного массового производства в машиностроении. Благодаря внедрению принципа взаимозаменяемости деталей наша промышленность изготавливает не только целые машины, но и большое количество запасных частей к ним. Это удешевляет и упрощает ремонт и эксплуатацию машин.

2.5 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗМЕРАХ, ПРОСТАВЛЯЕМЫХ НА ЧЕРТЕЖАХ ДЕТАЛЕЙ

1. Основные понятия. В соединении двух деталей, входящих одна в другую, различают охватывающую и охватываемую поверхности. Наиболее распространены в машиностроении соединения деталей с гладкими цилиндрическими (I) и плоскими параллельными (II) поверхностями. У цилиндрических соединений поверхность отверстия охватывает поверхность вала. Охватывающая поверхность называется отверстием, охватываемая — валом. Названия «отверстие» и «вал» условно применяются и к другим нецилиндрическим охватывающим и охватываемым поверхностям (рис. 11).

На рабочих чертежах в первую очередь проставляют размеры, которыми оценивают количественно геометрические параметры деталей.

Размер — это числовое значение линейной величины (диаметра, длины, высоты и т.п.). Размеры подразделяются на номинальные, действительные и предельные.

Номинальным размером (рис. 11) называется основной размер детали, рассчитанный с учётом её назначения и требуемой точности. Номинальный размер соединений — общий (одинаковый) размер для отверстия и вала, составляющих соединение. Номинальные размеры деталей и соединений выбирают не произвольно, а по ГОСТу 6636 «Нормальные линейные размеры».

В производстве номинальные размеры не могут быть выдержаны: действительные размеры всегда в большую или меньшую сторону отличаются от номинальных. Поэтому,

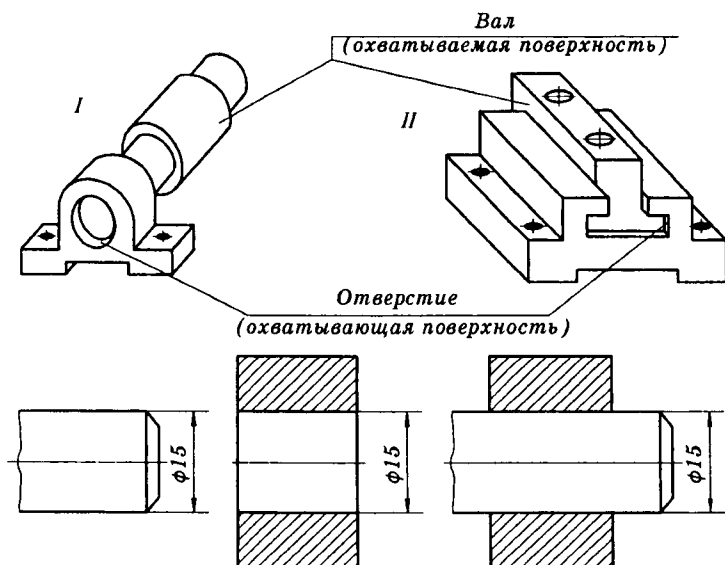


Рис. 11 Условные обозначения сопрягаемых поверхностей

помимо номинальных (расчётных), различают также действительные и предельные размеры.

Действительный размер — размер, полученный в результате измерения готовой детали с допустимой степенью погрешности. Допустимую неточность изготовления деталей и требуемый характер их соединения устанавливают посредством предельных размеров.

Предельными размерами называются два граничных значения, между которыми должен находиться действительный размер. Больше из этих значений называется наибольшим предельным размером, меньшее — наименьшим предельным размером (рис. 12). Таким образом, для обеспечения взаимозаменяемости на чертежах необходимо вместо номинального указывать предельные размеры. Но это сильно усложнило бы чертежи. Поэтому предельные размеры принято выражать посредством отклонений от номинального.

Предельное отклонение — это алгебраическая разность между предельными и номинальными размерами. Различают верхнее и нижнее предельные отклонения. **Верхнее отклонение** — это алгебраическая разность между наибольшим предельным размером и номинальным размером. В соответствии с ГОСТом 25346 верхнее отклонение отверстия обозначается ES , вала — es .

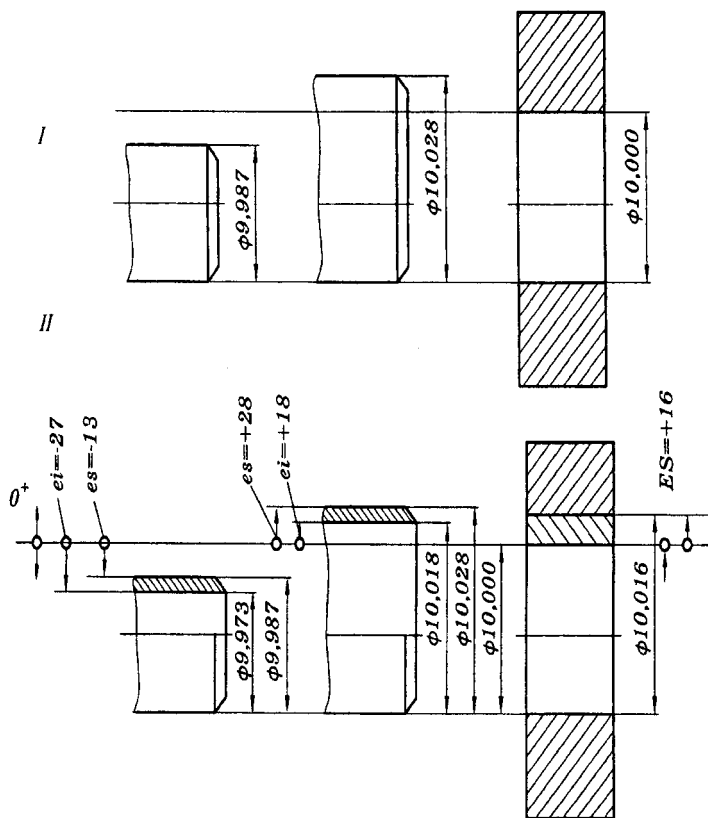


Рис. 12 Схема обозначения предельных размеров на чертеже

Нижнее отклонение — алгебраическая разность между наименьшим предельным размером и номинальным размером. Нижнее отклонение отверстия обозначается EI , вала — ei .

Номинальный размер служит началом отсчёта отклонений. Отклонения могут быть положительными, отрицательными и равными нулю (рис. 12, II). В таблицах стандартов отклонения указывают в микрометрах (мкм). На чертежах отклонения принято указывать в миллиметрах (мм).

Действительное отклонение — алгебраическая разность между действительным и номинальным размерами. Деталь считают годной, если действительное отклонение проверяемого размера находится между верхним и нижним отклонениями.

Допуск T — разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или абсолютная величина алгебраической разности между верхним и нижним отклонениями.

Стандарт ГОСТ 25346 устанавливает понятие «допуск системы», — это стандартный допуск, установленный системой допусков и посадок. Допуски системы ЕСДП обозначаются: IT01; IT1 ... IT17. Буквы IT обозначают «допуск ИСО». Так, IT7 обозначает допуск по 7-му качеству ИСО. Величина допуска не совсем полно характеризует точность обработки. Например, у вала $\varnothing 8 \pm 0,03$ мм и вала $\varnothing 64 \pm 0,03$ мм величина допуска одинаковая и равна 0,06. Но обработать вал $\varnothing 64 \pm 0,03$ мм значительно труднее, чем вал $\varnothing 8 \pm 0,03$ мм.

В качестве единицы точности, с помощью которой можно выразить зависимость точности от диаметра d , установлена единица допуска $i(I)$. Чем больше единиц допуска содержится в допуске системы, тем больше допуск и, следовательно, меньше точность, и наоборот (Приложение 1).

Число единиц допуска, содержащихся в допуске системы, определяется качеством точности. Под качеством понимается совокупность допусков, изменяющихся в зависимости от номинального размера. Качества охватывают допуски сопрягаемых и несопрягаемых деталей. Для нормирования различных уровней точности размеров от 1 мм до 500 мм в системе ЕСДП установлено 19 качеств: 01; 0; 1; 2 ... 17.

В настоящее время допуски измерительных инструментов и устройств — IT01 — IT1; допуски размеров в посадках — IT3 ... IT13; допуски неотчетливых размеров и размеров в грубых соединениях — IT 14 ... IT17. Для каждого качества на основе единицы допуска и числа единиц допуска закономерно построены ряды полей допусков.

Поле допуска — поле, ограниченное верхним и нижним отклонениями. Определяется оно величиной допуска и его положением относительно номинального размера. При графическом изображении (рис. 13) поле допуска заключено между двумя линиями, соответствующими верхнему и нижнему отклонениям относительно нулевой линии.

Все поля допусков для отверстий и валов обозначаются буквами латинского алфавита: для отверстий (I) — прописными (A, B, C, D и т.д.) и для валов (II) — строчными (a, b, c, d и т.д.). Ряд полей допусков обозначаются двумя буквами, а буквы O, W, Q и L не используются.

Допустим, что для какой-нибудь детали задан основной расчётный размер 25 мм. Это номинальный размер. В результате неточностей обработки действительный размер де-

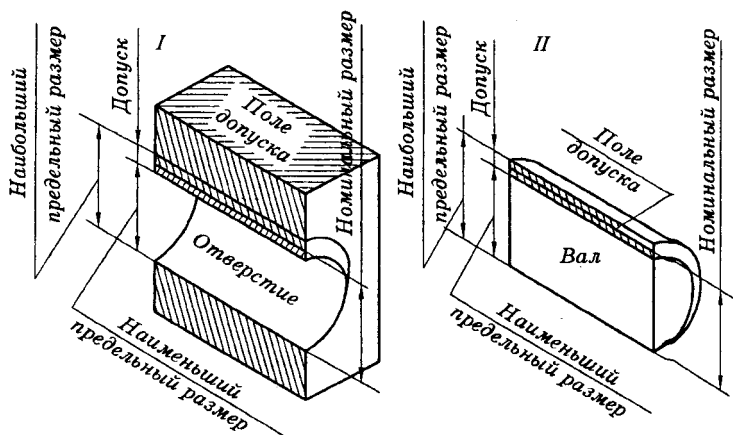


Рис. 13 Графическое изображение полей допусков отверстия и вала

тали может оказаться больше или меньше номинального. Однако действительный размер должен колебаться только в известных пределах. Пусть, например, наибольший предельный размер равен 25,028 мм, а наименьший предельный размер — 24,728 мм. Значит, допуск размера, характеризующий требуемую точность обработки детали, равен $25,028 - 24,728 = 0,300$ мм.

Как уже указывалось, на чертежах обозначают не предельные размеры, а номинальный размер и допускаемые отклонения — верхнее и нижнее.

Для рассматриваемой детали верхнее предельное отклонение будет равно: $25,028 - 25 = 0,028$ мм; нижнее предельное отклонение: $24,728 - 25 = 0,272$ мм.

Размер детали, проставляемый на чертеже, — $25^{+0,028}_{-0,272}$.

Верхнее предельное отклонение размера пишется над нижним. Значения отклонений записываются более мелким шрифтом, чем номинальный размер. Знаки «плюс» и «минус» показывают, какое действие нужно произвести, чтобы подсчитать наибольший и наименьший предельные размеры.

Если нижнее и верхнее предельные отклонения равны, то их записывают так: $25 \pm 0,028$. В этом случае размер шрифта у номинального размера и у равных абсолютных величин отклонений одинаковый. Если одно из отклонений равно нулю, то его совсем не указывают. В этом случае плюсовое отклонение наносят на место верхнего, а минусовое — на место нижнего предельного отклонения.

2.6 СИСТЕМА ДОПУСКОВ И ПОСАДОК. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОБОЗНАЧЕНИЕ ПОСАДОК

Любая операция сборки деталей заключается в необходимости соединить или, как говорят, «посадить» одну деталь на другую — отсюда и условно принятое в технике выражение «посадка» для обозначения характера соединения деталей. Одни соединения допускают определённую сво-

боду движения деталей относительно друг друга. Другие, наоборот, обеспечивают неподвижность соединённых деталей. Так, например, рабочий шкив ременной передачи должен быть плотно (неподвижно) насажен на вал, а холостой шкив может свободно вращаться на неподвижной оси.

Применение тех или иных посадок соответствует замыслу конструктора при проектировании машины. Таким образом, под словом «посадка» понимается не конструкция самого соединения, а степень подвижности собранных деталей относительно друг друга. Сборку двух деталей можно осуществить с зазором (одна деталь свободно входит в другую) или с натягом (для соединения таких деталей необходимо применить усилие).

Зазором (рис. 14, I) называется разность размеров отверстия D и вала d , если размер отверстия больше размера вала. Зазор обеспечивает свободу относительного перемещения деталей. Чем больше зазор, тем больше свобода движений в соединении.

Натягом (рис. 14, II) называется разность размеров вала и отверстия до сборки, если размер вала больше размера отверстия.

Посадки разделяют на три группы:

посадки с зазором (подвижные посадки). Для этих посадок диаметр отверстия больше диаметра вала, благодаря этому детали в собранном состоянии обладают свободой взаимного перемещения.

При конструировании машин подвижные посадки выбирают по условиям, в которых будет работать проектируемое соединение. При этом определяется такой зазор), при котором коэффициент трения минимален. Подвижные посадки разделяются между собой установленной величиной зазора. Каждая следующая посадка в приведённой таблице 1 последовательности характеризуется относительно меньшим зазором по сравнению с предыдущей.

Посадки с натягом (неподвижные посадки). Для этих посадок диаметр отверстия меньше диаметра вала, что обес-

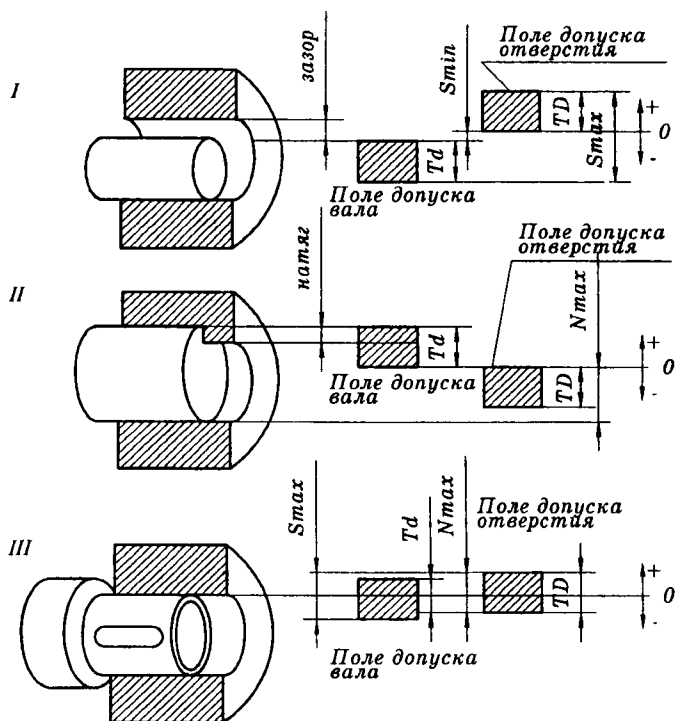


Рис. 14 Схема образования посадок и их изображение

печивает соединение с натягом. Посадки этой группы характеризуются неразъёмностью соединений. Такие соединения осуществляются под прессом, при нагреве охватывающей детали (отверстия) или охлаждения охватываемой (вала).

Неподвижные посадки применяют в том случае, когда возникает необходимость исключить возможность относительного перемещения соединённых деталей или передавать крутящий момент без дополнительных средств крепления (шпонки, винты установочные, штифты и т.п.).

Переходные посадки. Переходными эти посадки названы потому, что до сборки вала и отверстия нельзя сказать, что будет в соединении — зазор или натяг. Это означает,

что в переходных посадках диаметр отверстия может быть меньше, больше или равен диаметру вала (рис. 14, III). Группа переходных посадок предназначается для соединений, которые подвергаются разборке и сборке под лёгкими ударами деревянного или свинцового молотка.

Система ИСО содержит 27 обозначений полей допусков для отверстия, столько же — для валов. Путём сочетания разноименных полей допусков можно получить свыше 700 различных посадок, в которых отверстие и вал будут обозначаться не только одинаковыми, но и разными буквами.

Однако одновременное применение всех возможных полей допусков неэкономично, так как это затруднило бы унификацию изделий, размерных инструментов и калибров. Для практического применения рекомендуется ограниченное число предпочтительных посадок (27 посадок в интервалах размеров от 1 до 500 мм).

Ниже в таблице 2 приводится обозначение полей допусков по группам.

Таблица 2

Обозначение полей допусков и посадок

Допуски	Посадки с зазором	Переходные посадки	Посадки с натягом
Отверстия	<i>A, B, C, CD, D, E, EF, F, FG, G, H</i>	I, K, M, N	<i>P, R, S, T, U, V, X, Y, Z, ZA, ZB, ZC</i>
Вала	<i>a, b, c, cd, d, e, ef, f, fg, g, h</i>	i, k, m, n	<i>P, r, s, t, u, v, x, y, r, ra, rb, rc</i>
	→ Уменьшение зазора	Зазор или натяг	→ Увеличение натяга

Посадка образуется сочетанием полей допусков отверстия и вала. Условное обозначение посадки выполняется в виде дроби или в одну строку, причём в числителе или на первом месте указывается обозначение поля допуска отверстия, а в знаменателе или на втором месте — вала.

Системой допусков и посадок называется закономерно построенная совокупность стандартизованных допусков и

предельных отклонений размеров деталей, а также посадок, образованных отверстиями и валами, имеющими стандартные предельные отклонения.

Стандартом предусматривается возможность использования двух систем допусков и посадок: системы отверстия и системы вала.

В системе отверстия предельные размеры отверстия для всех посадок одного класса постоянны, а различные посадки достигаются за счёт изменения предельных размеров вала.

Во всех посадках системы отверстия нижнее отклонение отверстия $E_i = 0$, т.е. нижняя граница поля допуска отверстия, называемого основным отверстием и обозначаемого буквой H , всегда совпадает с нулевой линией.

В системе вала, наоборот, предельные размеры вала одинаковы для всех посадок заданного класса, а различные посадки создаются за счёт изменения предельных размеров отверстия. Во всех посадках вала верхнее отклонение вала $e_s = 0$, т.е. верхняя граница поля допуска вала, называемого основным валом и обозначаемого буквой h , всегда совпадает с нулевой линией.

Выбор системы отверстия или системы вала для образования той или иной посадки определяется конструктивными, технологическими и экономическими требованиями.

В связи с тем, что точные отверстия обрабатывают дорогостоящим режущим инструментом и изготавливать их сложнее, система отверстия на наших заводах принята как основная.

Примечание. Система вала применяется только в необходимых случаях.

2.7 СХЕМАТИЧЕСКОЕ ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОЛЕЙ ДОПУСКОВ

Выбор и назначение допусков и посадок

В технической документации широкое распространение нашло условное схематическое графическое изображение по-

лей допусков деталей. Обусловлено это многими причинами. При обычных масштабах, в которых выполняют чертежи деталей или сборочных единиц, трудно показать зрительно различимыми допуски и отклонения, так как они очень малы. Достаточно сказать, что во многих случаях допуски и отклонения не вышли бы за пределы толщины линии карандаша. Вместе с тем в практической работе конструктора часто возникает необходимость в наглядном изображении полей допусков и отклонений соединяемых деталей. С этой целью изображения допусков и отклонений даются в виде заштрихованных прямоугольников, выполненных в значительно большем масштабе по сравнению с масштабами самого чертежа. Каждый такой прямоугольник имитирует собой поле допуска отверстия и поле допуска вала.

При горизонтальном расположении нулевой линии положительные отклонения откладывают вверх от неё, а отрицательные — вниз. Далее отмечают величины верхнего и нижнего отклонений отверстия и вала и от них проводят горизонтальные линии произвольной длины, которые соединяют вертикальными прямыми. Полученное в виде прямоугольника поле допуска заштриховывают (поле допуска отверстия и поле допуска вала, как и смежные детали, заштриховываются в разные стороны).

Подобная схема даёт возможность непосредственно определить величину зазоров, предельных размеров, допусков, натягов. Наглядные изображения трёх групп посадок и соответствующие им схематические изображения расположения полей допусков показаны на рисунке 14.

На примере (рис. 15) показано, как строятся графические изображения полей допусков. Проводим горизонтальную нулевую линию, перпендикулярную к ней — вертикальную, а на ней — шкалу. Выбираем масштаб: одно деление соответствует отклонению 10 мкм. Строим поле допуска отверстия: например, проводим одну горизонтальную линию на уровне — 30 мкм (верхнее отклонение) от оси; нижнее отклонение равно нулю; следовательно, вторая гори-

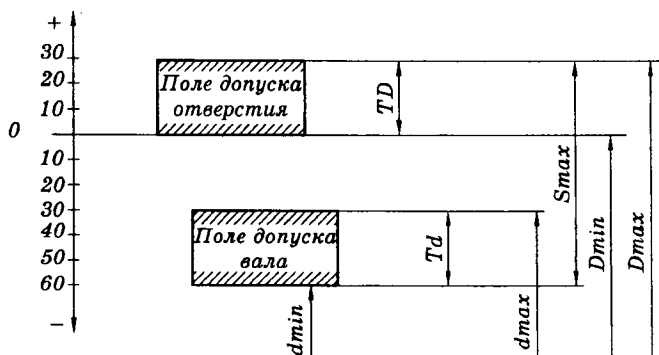


Рис. 15 Построение полей допусков и расчет посадок

горизонтальная линия совпадает с нулевой. Соединяем эти линии, получаем поле допуска. Наносим наибольший D_{max} и наименьший D_{min} предельные размеры и обозначаем допуск отверстия — TD .

Аналогично строим поле допуска вала, проводя горизонтальные линии на уровне 30 мкм (верхнее отклонение) и 60 мкм (нижнее отклонение). Отмечаем наибольший зазор S_{max} (он равен расстоянию от верхнего отклонения отверстия до нижнего отклонения вала), наименьший зазор S_{min} (расстояние от нижнего отклонения отверстия до верхнего отклонения вала) и обозначаем допуск вала — T_d . Из схемы видно, что $S_{max} = 90$ мкм, $S_{min} = 30$ мкм. Таким образом, допуск зазора $T = S_{max} - S_{min} = 90 - 30 = 60$ мкм.

В конструкторской практике применяются в основном методы выбора допусков и посадок, приведённые ниже.

Метод подобия. Он заключается в том, что конструктор отыскивает в однотипных или других машинах, ранее сконструированных и оправданных себя в эксплуатации, случаи применения составных частей (сборочных единиц), подобных проектируемой, и по аналогии назначает допуски и посадки.

Расчётный метод. Этот метод требует согласования квалитетов, допусков и посадок при проектировании машин и других изделий с расчётными величинами [20].

При выборе и назначении допусков и посадок конструктор всегда исходит из того, что изготовление деталей по качеству, соответствующему большей точности, т.е. с малым допуском, связано с повышением себестоимости из-за больших трудовых и материальных затрат на оборудование, приспособления, инструмент и контроль. Но при этом обеспечиваются высокая точность сопряжений, высокие эксплуатационные показатели изделия в целом.

Изготовление деталей по квалитетам с расширенными допусками проще, не требует точного оборудования и отделочных технологических процессов, однако точность сопряжений и, следовательно, долговечность машин снижены.

Таким образом, перед конструкторами всегда стоит задача: рационально, на основе технико-экономических расчётов, разрешать противоречия между эксплуатационными требованиями и технологическими возможностями, исходя в первую очередь из выполнения эксплуатационных требований.

В учебной практике, видимо, проще пользоваться методом подобия. Вместе с тем при необходимости уточнений следует уметь обращаться к справочным таблицам стандартных величин допусков и предельных отклонений.

Пример. Предположим, что в период выполняемой вами работы возникла необходимость уточнить характер соединения двух деталей и назначить для каждой рациональный допуск. Сначала, пользуясь таблицей 10, следует установить, какая из трёх групп посадок необходима для выполнения данным соединением рабочей функции. При этом надо учитывать, что каждое последующее буквенное обозначение основного отклонения зазора и натяга означает соответственно уменьшение зазора и увеличение натяга.

Теперь обратимся к ГОСТу 25347. По содержащейся в нём таблице «Рекомендуемые посадки в системе отверстия при номинальных размерах от 1 до 500 мм» выбираем для данного сочленения двух деталей посадку, например, *h6*.

Далее, пользуясь этим же стандартом, обращаемся к таблице полей допусков 7-го квалитета. Предположим, что необходимо сочленить вал с отверстием диаметром $\varnothing 36$ мм. По таблице определяем величину предельных отклонений для отверстия с полем допуска $H7$. В интервале размеров от 30 до 40 мм устанавливаем следующие значения предельных отклонений: $^{+25}_0$ мкм. Для вала с полем допуска $k6$ по 6-му квалитету значение предельных отклонений равно: $^{+3}_{-13}$ мкм. Теперь на эскизе или чертеже детали с отверстием пишем $\varnothing 36^{+0,025}$ мм; на эскизе или чертеже вала — $\varnothing 36^{+0,003}_{-0,013}$ при необходимости подсчитать величину допуска можно пользоваться рекомендациями, указанными выше.

На рисунке 16 приведены примеры простановки полей допусков (I) и посадок (II) на чертежах.

2.8 ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ (МАКРОГЕОМЕТРИЯ)

При разработке технологических процессов одной из основных задач, которую приходится решать технологу, является обеспечение в соответствии с чертежом точности размеров, надлежащей формы и правильного взаимного положения отдельных поверхностей обрабатываемой детали. Сложность этой задачи заключается в том, что в процессе изготовления детали возникает целый ряд производственных погрешностей, предварительная оценка величины которых может быть произведена лишь приближённо.

Известно, что при выполнении на станках каких-либо производственных работ все части станка находятся под действием усилия резания, достигающих значительных величин и вызывающих ощутимые деформации частей станка.

В процессе обработки могут возникать значительные вибрации упругой системы станок — инструмент — деталь.

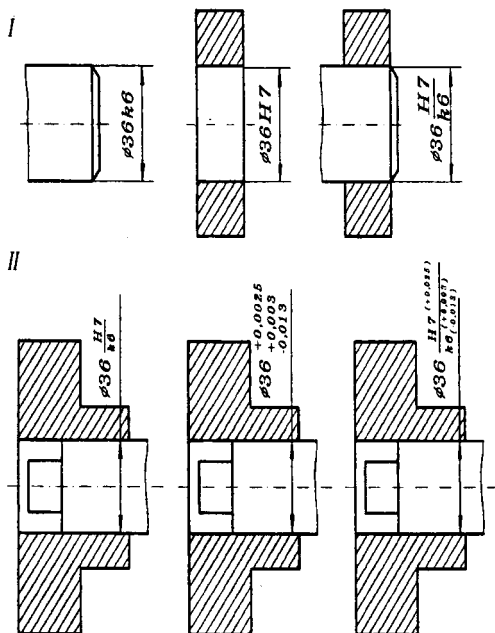


Рис. 16 Примеры простановки размеров, допусков и посадок на чертеже

Они часто превращаются в один из главных источников производственных погрешностей. Кроме того, в процессе работы отдельные поверхности станка изнашиваются, создавая дополнительные погрешности.

Значительное влияние на конечную точность обработки оказывают также погрешности изготовления и износ режущего инструмента. Эти погрешности появляются при обработке деталей мерным или профильным инструментом (зенкером, развёрткой, резьбонарезным инструментом, профильным резцом и др.). При использовании указанных инструментов погрешности их размеров или профиля полностью переносятся на обрабатываемую деталь. Существуют и другие причины погрешностей.

Таким образом, ясно, что в процессе изготовления деталей влияние различных производственно-технологических

условий приводит к таким погрешностям, при которых реальная поверхность (ограничивающая полученную деталь) отличается от геометрической.

Все эти отклонения делятся на погрешности, связанные: 1 — с нарушением установленной по чертежу формы; 2 — нарушением взаимного расположения отдельных поверхностей. Отклонения формы и расположения поверхностей изображены в таблице 2.

Комплексным понятием, характеризующим любые отклонения цилиндрической формы как в поперечном, так и в продольном сечениях, является отклонение от цилиндричности.

Отклонение от цилиндричности (нецилиндричность) — наибольшее расстояние от точек реальной (полученной в процессе обработки) поверхности до прилегающего цилиндра (установленной по чертежу номинальной геометрической формы).

Отклонение от круглости — все отклонения формы в поперечном сечении, элементарными видами которого являются огранка и овальность, а в продольном сечении — конусообразность, бочкообразность, седлообразность и изогнутость

Отклонение от плоскостности (неплоскостность) — наибольшее расстояние от точек реальной (полученной в процессе обработки) поверхности до прилегающей плоскости (установленной по чертежу номинальной геометрической формы).

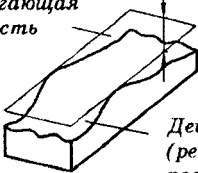
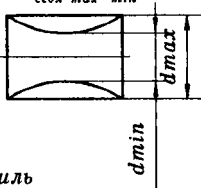
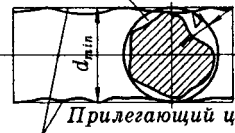
Отклонения от прямолинейности (непрямолинейность) — наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей прямой.

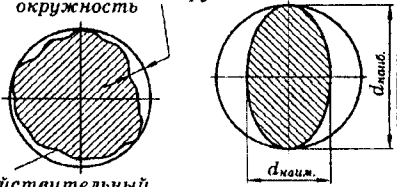
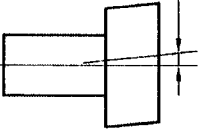
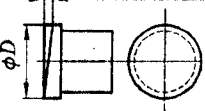
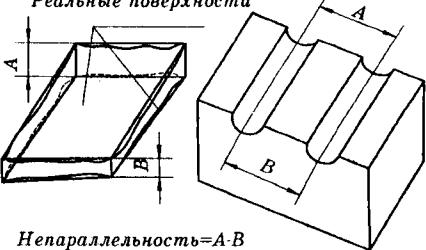
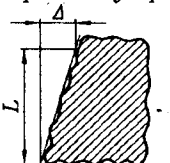
Отклонение от соосности (несоосность — несовпадение осей цилиндрических поверхностей одной детали). Несоосность может выражаться в следующем: к примеру, по чертежу две поверхности ступенчатого валика должны быть соосны, а после изготовления детали оказалось, что оси их ступеней, будучи параллельными, расположены одна от другой на некотором расстоянии, называемом эксцентриситетом, либо под некоторым углом.

Торцовое биение — отклонение от перпендикулярности торцевой поверхности цилиндрической детали относительно её оси.

Отклонение от параллельности (непараллельность) — отклонение от параллельности двух плоскостей, двух осей поверхностей вращения, оси по отношению к плоскости.

Таблица 3
Отклонения взаимного расположения поверхностей

Наименование отклонения	Примеры отклонения флоры поверхностей
Отклонение плоскости 	Неплоскостность 
Отклонение от прямолинейности 	Прилегающая прямая Заданная длина  Действительный (реальный) профиль Непрямолинейность $\Delta = d_{\text{седл}} - d_{\text{max}} - d_{\text{min}}$ 
Отклонение от цилиндричности	Реальная поверхность вала  Прилегающий цилиндр Δ - отклонение от цилиндричности

Наименование отклонения	Примеры отклонения флоты поверхностей
Отклонение от круглости	Прилегающая окружность Некруглость  Действительный (реальный) профиль некруглость $\Delta_{ов.} = d_{наиб.} - d_{наим.}$ овальность
Отклонение от соосности	Несоосность 
Торцовое биение	Торцовое биение на ϕD 
Отклонение от параллельности	Реальные поверхности  Непараллельность = $A - B$
Отклонение от перпендикулярности	Неперпендикулярность 

Отклонения от перпендикулярности (неперпендикулярность) — отклонение угла между двумя плоскостями, двумя осями поверхностей вращения от прямого угла.

Кроме перечисленных, имеются и некоторые другие погрешности обработки деталей, о которых рассказывается в специальной литературе. Эти погрешности искажают характер сопряжения деталей при сборке и ухудшают качество работы машины, механизма в целом.

Всё это заставляет ограничить величины возможных отклонений форм и расположения поверхностей допусками, предусмотренными ГОСТом 24643 (рис. 17).

На чертежах предельные отклонения формы и расположения поверхностей обозначают согласно ГОСТу 2.308.

Чтобы удобно было обозначать отклонения на чертежах, стандарт предусматривает полные и краткие наименования отклонений и их символические обозначения. Отклонения можно указывать на чертеже условным обозначением её вида или текстовой записью на свободном поле чертежа. Текстовые записи рекомендуются в тех случаях, когда условные обозначения слишком затемняют чертёж или не определяют полностью технических требований к детали. В текстовой записи указывают краткое наименование заданного отклонения, буквенное обозначение или наименование элемента (например, поверхности), для которого задаётся предельное отклонение и его величина в мм. Если отклонение относится к расположению поверхностей, то отмечают ещё и базы, относительно которых оно задано (базами могут быть линия, общая ось или плоскость симметрии и т.д.).

Чтобы допуски на отклонения формы и расположения поверхностей не смешивались с другими допусками, на чертеже их помещают в прямоугольных рамках, которые соединяют выносной линией со стрелкой, или с контурной линией поверхности, или с размерной линией элемента, или с осью симметрии (если отклонение относится к общей оси). Прямоугольные рамки делят на две или три части. В первой приводят символ отклонения; во второй — величину предельного

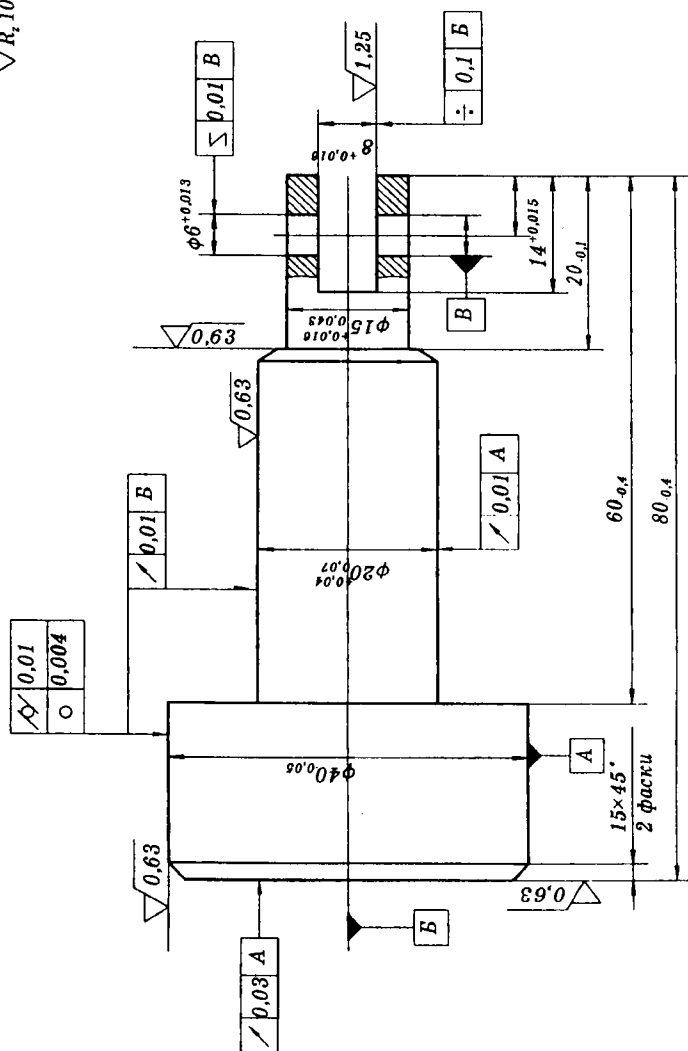
$\sqrt{R_{z,10}(\sqrt{z})}$


Рис. 17 Пример выполнения рабочего чертежа валика

отклонения. Третья часть рамки вводится в тех случаях, когда нужно показать обозначение базовой или другой поверхности, к которой относится отклонение (рис. 17).

2.9 ШЕРОХОВАТОСТЬ (МИКРОГЕОМЕТРИЯ) ПОВЕРХНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Общие сведения

На любой обработанной поверхности при сильном увеличении хорошо заметны следы режущих кромок инструментов и зёрен шлифовальных кругов в виде близко расположенных друг к другу впадин и гребешков продольных 2 и поперечных 1 (рис. 18, I). Совокупность всех микронеровностей, образующих рельеф поверхности детали, называется шероховатостью поверхности.

Величина шероховатости или микронеровностей, определяемая высотой гребешков и глубиной впадин, оказывает весьма существенное влияние на эксплуатационные характеристики деталей — трение, износоустойчивость, прочность, антикоррозионную стойкость и т.д. Чем больше высота неровностей, тем сильнее сцепление между гребешками, а потому при относительном перемещении поверхностей следует затратить некоторую силу, чтобы преодолеть это сцепление, т.е. трение, что ведёт к уменьшению КПД машины. Соприкосновение деталей происходит по вершинам выступов микронеровностей (рис. 18, II), образующим так называемую контактную поверхность, которая обычно всегда меньше реальной, т.е. общей поверхности детали. Даже после тонкой шлифовки соединяемых деталей контактная поверхность в 2...3 раза меньше номинальной. При обычной же чистовой обработке резцом действительная площадь касания составляет менее 20 % реальной.

В зависимости от назначения и условий работы детали машин допускают различную шероховатость их поверхнос-

ти. На одной и той же детали шероховатости её различных поверхностей могут очень сильно отличаться друг от друга. Почему же нельзя все поверхности деталей делать с минимально возможной шероховатостью? Объясняется это тем, что такая обработка поверхности требует значительных затрат труда. Правильное назначение конструктором шероховатости поверхности, соответствующей условиям работы детали, имеет огромное значение в машиностроении.

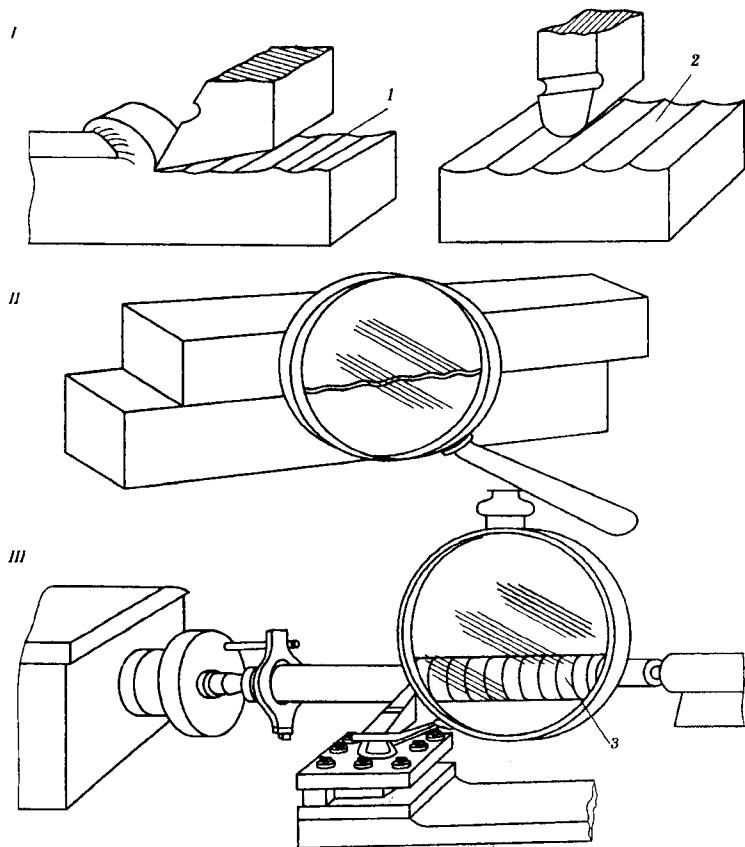


Рис. 18 Примеры образования шероховатости при резании резцом

Требования к шероховатости поверхности. Согласно ГОСТу 2789 требования к шероховатости поверхности должны быть обоснованными и устанавливаться, исходя из функционального назначения поверхности. Если требований к шероховатости поверхностей не установлено, то она не подлежит контролю.

Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться путём указания числового значения параметра (параметров) и значений базовой длины, на которой происходит определение параметра. Шероховатость поверхности оценивается количественно или качественно. Количественная оценка состоит в определении высоты шероховатости по одному из нижеуказанных параметров при помощи приборов. Качественная оценка шероховатости заключается в сравнении её с образцами.

Понятие о параметрах шероховатости поверхности

Стандарт ГОСТ 2789 предусматривает шесть параметров шероховатости.

Высотные: Ra — среднее арифметическое отклонение профиля; Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам; R_{max} — наибольшая высота профиля.

Шаговые: S — средний шаг неровностей профиля по вершинам; S_m — средний шаг неровностей профиля по средней линии; tp — относительная опорная длина профиля.

Все определения параметров приведены в справочном приложении к ГОСТу 2789. Остановимся теперь подробнее на двух основных параметрах, обозначаемых символами Ra и Rz . Среднее арифметическое отклонение профиля Ra определяется как среднее значение расстояний отдельных точек профиля $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ до средней линии гребешков OX (рис. 19).

Пять высших точек выступов и пять низших точек впадин (рис. 19) берут в пределах базовой длины L — длины участка поверхности, принятого для измерения шероховатости.

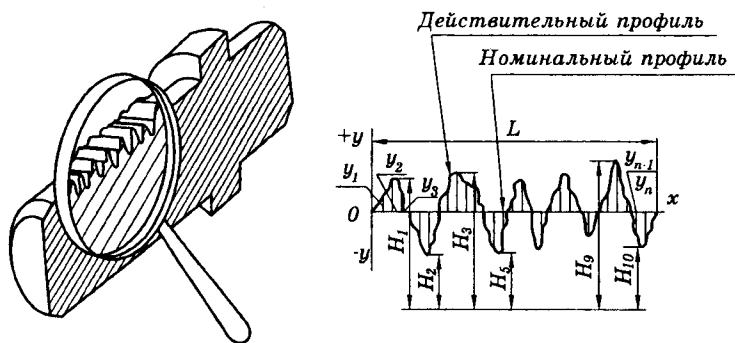


Рис. 19 Пример определения параметров шероховатости

Базовой называется длина участка поверхности, характеризующая шероховатость поверхности и используемая для количественного определения её параметров. Предельные значения величин Ra и Rz , обозначаемые на чертежах числовой величиной шероховатости в микрометрах, установлены ГОСТом 2789. Этим же стандартом подразделение шероховатости на классы проведено по двум параметрам Ra , но каждый класс определён только по одному из этих параметров и базовой длине. Такое уточнение класса шероховатости сделано для однозначности контроля.

Обозначение требований к шероховатости поверхностей в соответствии с ГОСТом 2789 и правила нанесения их в технической документации определены ГОСТом 2.309. При установлении требований к шероховатости поверхностей из эксплуатационных соображений следует учитывать возможность обеспечения их в процессе изготовления изделия.

Шероховатость поверхности образуется в направлении главного движения — движения резания вдоль обработочных рисок (продольная шероховатость) и в направлении поперечной подачи (поперечная шероховатость). Форма, размер и расположение неровностей зависят от способа обработки. Меняя способ обработки, можно изменять характер и расположение неровностей.

Метрологический контроль шероховатости поверхности [16]

При метрологическом контроле шероховатости поверхностей обычно решают две задачи: 1 — определяют принадлежность контролируемой поверхности к назначенному классу шероховатости, 2 — определяют годность поверхности детали в отношении требований к шероховатости поверхности, если класс шероховатости поверхности не грубее указанного в технической документации.

Приборы, используемые для определения шероховатости по Ra или Rz , разделяются на две группы: контактные (профилографы и профилометры) и бесконтактные (оптические).

Работа профилографов основана на фотозаписи луча света, очерчивающего в увеличенном виде профиль неровности проверяемой поверхности при скольжении по ней алмазной иглы.

На рисунке 20 представлена схема наиболее широко применяющегося в практике оптико-механического профилографа. Алмазная игла 1, скользящая по проверяемой поверхности, связана с зеркалом 2, на которое падает от лампы луч света, проходящий через диафрагму 8 и линзу 6. Колебания алмазной иглы, скользящей по шероховатой поверхности, изменяют направление отраженного от зеркала луча света, и он через систему зеркал 3-5 попадает на вращающийся барабан 7 со светочувствительной бумагой. После проявления на бумаге остаётся след отражённого зеркалами луча света, который прочертил в увеличенном масштабе (фотозапись луча) микропрофиль шероховатой поверхности — профилограмму. Профилограмма очень важна в оценке износостойкости поверхности детали.

Оценка класса шероховатости поверхности детали производится измерением её в направлении наибольшего значения, т.е. поперечной шероховатости, которая обычно в 2...3 раза превышает продольную шероховатость.

В таблице 4 заданы числовые значения параметров шероховатости Ra и Rz в виде диапазонов определенного класса по ГОСТу 2789.

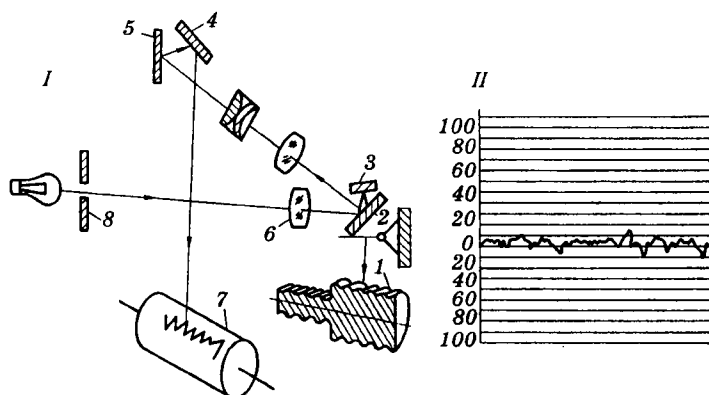


Рис. 20 Принципиальная схема профилграфа (I) и пример профилграммы (II)

Подробнее об измерении параметров шероховатости см. [6].

Таблица 4

Соотношение значений высотных параметров R_a , R_z , R_{max} и базовой длины L по ГОСТу 2789

R_a , мкм	$R_z = R_{max}$, мкм	L , мкм
До 0,025	До 0,10	0,08
Св. 0,025 до 0,4	Св. 0,10 до 1,6	0,25
Св. 0,4 до 3,2	Св. 1,6 до 12,5	0,8
Св. 3,2 до 12,5	Св. 12,5 до 50	2,5
Св. 12,5 до 100	Св. 50 до 400	8,0

Классы 1 ... 5, 13 и 14 определены через параметр R_z , классы 6 ... 12 — через параметр R_a . Такое разделение произведено с учётом возможностей измерения этих параметров существующими измерительными средствами. Так, профилометры служат для непосредственного измерения параметра R_a в пределах 6 ... 12 классов, а профилографы и оптические приборы одновременного преобразования профиля (микроинтерферометры, приборы светового сечения, растровые микроскопы) позволяют измерить параметр R_z с наибольшей трудоёмкостью.

2.10 ВЫБОР ШЕРОХОВАТОСТИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Характер и величина шероховатости поверхности детали зависят от вида её механической обработки. При выполнении чертежей деталей в процессе детализирования сборочного чертежа и при выполнении эскизов деталей с натуры приходится решать вопросы, связанные с назначением (выбором) шероховатости поверхностей.

В любом соединении есть соприкасающиеся поверхности двух или нескольких деталей. По тому, насколько плотно или свободно это касание, можно судить о подвижности деталей, входящих в соединение. Характер соединения позволяет назначить шероховатость поверхностей детали.

По назначению и взаимодействию поверхности деталей разделяют на две основные группы: 1 — *сопрягаемые поверхности* — поверхности соприкосновения и взаимодействия двух или нескольких деталей в соединении; 2 — *свободные поверхности* — те, которые с поверхностями других деталей не взаимодействуют. Количество сопрягаемых поверхностей определяет степень подвижности или плотности сборки деталей. Количество свободных поверхностей определяет степень простоты изготовления деталей.

Назначение числовых значений параметров шероховатости сопрягаемых поверхностей зависит от необходимой точности соединений, от требований к внешнему виду и эксплуатационных свойств.

Прямой связи между точностью изготовления и шероховатостью не существует, так как всегда можно предъявить высокие требования к шероховатости поверхности при весьма неточном изготовлении её. Однако, чем меньше поле допуска, тем более высокие требования предъявляются к шероховатости поверхности. Это позволяет ориентировочно выбирать минимально необходимую шероховатость поверхности детали в зависимости от допуска с помощью диаграммы (рис. 21).

Наибольший диаметр ступенчатого валика, приведённого на том же чертеже в качестве примера, обозначен $\varnothing 52_{-0,019}^0$. По таблице полей допусков валов ГОСТ 25347 (табл. 2) в колонке *h6* определяем предельные отклонения для вала диаметром $\varnothing 52$ мм. Они составляют 19 мкм. Следовательно, допуск равен 19 мкм. Теперь, пользуясь диаграммой, находим параметр шероховатости поверхности. Как видно из диаграммы, допуску 19 мкм должна соответствовать шероховатость поверхности параметра *Ra* в диапазоне 0,63 ... 1,25 мкм.

Аналогично можно установить шероховатости и для размера $\varnothing 30_{-0,013}^0$.

Примечание. Заштрихованное между двумя кривыми линиями поле ограничивает пределы достигаемой шероховатости поверхности при одной и той же точности изготовления.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Перечислите основные особенности мировой экономики на современном этапе развития материального производства.
2. Назовите направление стратегического вектора развития производственных отношений в современных условиях.
3. Что подразумевается под техническим термином «создание и освоение новой техники» (СОНТ)?
4. Что представляет собой взаимосвязь науки, техники и производства в современных условиях?
5. Какую роль играет стандартизация в машиностроении и её основные задачи?
6. Каким образом реализуется специализация машиностроительного производства и её экономическое значение?
7. Какая система обозначения стандартов существует в России?
8. На чём основывается система комплексной стандартизации в России? Примеры.
9. Как образуются основные ряды предпочтительных чисел?
10. Что представляют собой параметрические подобные ряды некоторых машин?

ГЛАВА 3. РАСЧЁТЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ УЗЛОВ И МАШИН

3.1 НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Надёжность — одна из наиболее общих и важных характеристик, определяющих уровень функциональных показателей любых технических устройств. От надёжности зависят безопасность, экономичность, ресурс работы, конкурентоспособность изделия.

Ведущей концепцией, на основе которой решается задача повышения надёжности техники на современном этапе её развития, является системность. *Системы обеспечения надёжности охватывают весь жизненный цикл изделия от разработки до эксплуатации.* Так, ключевыми методами обеспечения проектной надёжности являются: выбор соответствующих материалов, запасов прочности, применение в конструкции различных схем резервирования и т.п. Технологическая надёжность обеспечивается бездефектными стабильными технологическими процессами производства. При этом прослеживается несколько тенденций.

Одна из них — *классическая, основанная на статистической теории надёжности*, сложившаяся в условиях массового производства. Эта концепция позволяет планировать стратегии обслуживания *для партии идентичных изделий* и не гарантирует оптимального обслуживания каждого отдельного изделия этой партии. Результатом планирования при таком подходе является определение некоторых нормативных показателей, например назначенного ресурса, для всей партии изделий.

Зародившись при развитии учения о качестве как условия обеспечения бездефектного производства, оценка надёжности особенно актуальна для сложных технических систем, отказы которых связаны с прямой угрозой жизни человека (транспорт, авиация, ракетно-космическая техника)

или экологическими последствиями (ядерная энергетика, химическая и нефтеперерабатывающая промышленности и т.д.). Накопление статистических данных об отказах показало, что они происходят как в период назначенного ресурса, так и за его пределами. Поэтому наблюдается растущая потребность в разработке новых методов обслуживания каждого изделия по его *фактическому состоянию*.

В настоящее время считается, что обслуживание по фактическому состоянию является концептуальной основой технологии XXI века. Ведущие машиностроительные фирмы на западе, кроме производства изделий, стремятся к созданию сети сервисных центров по всему миру. Этим обеспечивается эффективность обслуживания по фактическому состоянию, которая зависит в первую очередь от точности идентификации деградационных процессов, протекающих при эксплуатации изделия.

Идентификация фактического состояния сложных технических систем, обнаружение предотказного состояния, прогнозирование динамики изменения состояния в процессе эксплуатации, определение остаточного ресурса — все эти задачи составляют части единой проблемы: *обеспечение безотказного функционирования техники*. Решение этих задач базируется на использовании всего опыта, накопленного к настоящему времени в научно-техническом направлении «НАДЕЖНОСТЬ».

Три этапа в развитии научно-технического направления «надёжность»

Научно-техническое направление «надёжность» прошло в своём развитии ряд этапов. Уже в начале XX века для обеспечения надёжности использовали «запасы» прочности. Однако такой «запас» часто приводил к увеличению габаритов и массы изделий и, соответственно, дополнительным расходам материалов. Стремление уменьшить нежелательные эффекты стимулировало изучение реальных на-

грузок на изделие в эксплуатации, изучение связи несущей способности и конструкции, процессов изменения их состояния вследствие старения, усталости и других факторов.

Основой для решения задач по обеспечению надёжности явились теория вероятности и математической статистики. На их базе уже в 30-е годы XX в. установлена статистическая природа коэффициентов запаса прочности и сформулировано понятие отказа как превышение нагрузки над прочностью.

В нашей стране программа электрификации дала толчок развитию идеи «резервирования» при параллельном использовании генераторов и трансформаторов в процессе создания энергосистем, обеспечивающих бесперебойное снабжение электроэнергией всех отраслей народного хозяйства. Особенно бурное развитие теории надёжности началось с интенсификации электроники и автоматики, авиации и ракетно-космической техники. Полуэмпирические подходы к обеспечению надёжности перестали удовлетворять требованиям практики, связанным с необходимостью уменьшения массы и габаритов аппаратуры, сокращением сроков проектирования и внедрения образцов новой техники. В сложившихся условиях возникли предпосылки к созданию нового научно-технического направления «надёжность».

В 1951 г. проблема надёжности получила признание конгресса США. Развитие этого направления можно разделить на три этапа: 50-е годы XX в. становления направления; 60-е годы XX в. этап классической теории надёжности; с 70-х годов XX в. по настоящее время — этап системных методов оценки надёжности.

Первый этап в решении проблем надёжности был связан с выяснением причин отказов оборудования. В декабре 1950 г. ВВС США организовали группу для изучения проблемы надёжности радиоэлектронного оборудования и разработки мер, направленных на её повышение и сокращение эксплуатационных затрат. В конце 1952 г. министерство обороны США образовало консультативную группу по на-

дёжности, составленную из представителей правительственных организаций и промышленности. В 1957 г. эта группа опубликовала доклад со своими рекомендациями, многие из которых появились в военных стандартах на электронное оборудование и системы.

Было установлено, что основная причина отказов радиоэлектронной аппаратуры заключалась в низкой надёжности элементов и её уменьшении в процессе хранения в запасах. Перед разработчиками возникли вопросы: каковы основные причины ненадёжности элементов и имеются ли пути их устранения? Существуют ли способы создания надёжных систем из ненадёжных элементов и можно ли прогнозировать надёжность проектируемой системы? Ответ на поставленные вопросы потребовал изучения влияния на отказы эксплуатационных факторов — температуры, среды, вибраций, электрической нагрузки и пр. Центр тяжести перемещается на механическое и электромеханическое оборудование, на конструкцию, на стыки оборудования, на проведение работы в недостаточно хорошо изученных условиях. В результате был собран богатый статистический материал для оценки характеристик надёжности элементов.

В 1953 г. появляются первые контракты, требующие экспериментального подтверждения надёжности аппаратуры. Начинается переход ко второму этапу. Возрастающее количество испытаний на надёжность и критический анализ причин отказов показали их существенную зависимость от комплекса условий: конструкции изделий, технологии производства и условий эксплуатации. Было установлено, что причины отказов можно обнаружить и устранить. Требования американских стандартов того времени нашли наиболее полное воплощение в обширной программе «APOLLO» по обеспечению надёжности космических летательных аппаратов в процессе разработки, производства и наземной экспериментальной отработки.

Результаты исследований позволили выявить многочисленные конструктивные и технологические дефекты,

которые привели бы к отказу в полёте со 100 % вероятностью. В процессе работ на этом этапе выявилось недостаточная эффективность выборочного контроля и статистических испытаний на надёжность, не исключающих отказы техники при эксплуатации. В результате появились новые вопросы: как на ранних этапах создания систем заложить возможности обеспечения высокой надёжности? Как соразмерить программу обеспечения надёжности со степенью ответственности решаемых задач и с ожидаемым эффектом?

Начиная с 1968 г. происходит переход к третьему этапу. Национальным агентством по авионавигации и космическим исследованиям NASA был опубликован новый вариант требований к надёжности, заложивший основу современных систем и программ обеспечения надёжности.

Среди них:

- чёткое планирование и эффективное руководство всеми работами в области надёжности, их места в процессе проектирования;
- оценка надёжности (с учётом взаимного влияния документального и математического обеспечения) путём использования инженерного анализа испытаний, экспериментальных оценок и прогнозирования;
- регулярная и своевременная информация о состоянии дел в области надёжности разрабатываемой системы. Отличием третьего этапа является сосредоточение усилий на качественных аспектах надёжности, но это не исключает и количественные аспекты, составляющие основное содержание предыдущих этапов.

Стандартизация в области надёжности техники

В 1965 г. при Международной электротехнической комиссии (МЭК) был образован технический комитет (ТК 56) «Безопасность и ремонтпригодность». С 1976 г. стандартам, разрабатываемым ТК 56, придаётся большая практи-

ческая направленность, отражающая системный подход к решению задач безотказности и ремонтпригодности.

В 1986 г. принята концепция «инструментального ящика», положившая начало разработке систематизированной структуры стандартов МЭК по надёжности. В 1989 г. в соответствии с общими тенденциями развития техники наименование ТК изменяется на «Надёжность».

В 1990 г. происходит переориентация деятельности ТК 56 на общетехнические стандарты по надёжности, распространяющаяся на все виды техники, подпадающие под сферу действия всех технических комитетов МЭК и ИСО. Теперь программа работ ТК 56 не ограничивается стандартами на электротехнику и радиоэлектронику. В том же году была организована объединённая группа «качество, надёжность, статистика», координирующая работу ТК 56 с комитетами ИСО ТК 176 по управлению качеством и ТК 69 по применению статистических методов.

В 1993 г. издан первый стандарт под двойным номером: МЭК 300 — 1 / ИСО 9000 — 4, положивший начало гармонизации стандартов МЭК по управлению надёжностью (серия 300) и стандартов ИСО управлению качеством (серия 9000). В 1995 г. произошло официальное придание ТК 56 статуса «горизонтального» комитета, работающего на «вертикальные» видовые комитеты МЭК и ИСО.

3.2 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ

Основные общетехнические показатели надёжности приведены в отечественных стандартах ГОСТ 27.002.

Надёжностью называют свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

Долговечностью называют свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния

при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Безотказность — свойство объектов сохранять работоспособное состояние *в течение некоторой наработки*. К характеристикам безотказности относят: наработку на отказ партии однотипных изделий, находящихся в эксплуатации; интенсивность отказов; вероятность безотказной работы.

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Отказы следует отличать от неисправных состояний, при которых изделие не соответствует хотя бы одному из требований технических условий, но сохраняет свою работоспособность.

Катастрофические отказы — разрушение конструкции, взрывы и т.п., создающие опасность для жизни людей или влекущие большой материальный ущерб, должны быть исключены из анализа с помощью специальных испытаний. Они не входят в систему количественных оценок теории надёжности.

Ресурсом называется суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Назначенным ресурсом называется суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.

Прекращение эксплуатации связано с требованиями безопасности или экономической целесообразности. В пределах назначенного (общетехнического) ресурса обычно предусматривается один или несколько ремонтов.

Ремонтопригодностью называется свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность характеризуется двумя показателями: ремонтной технологичностью (РТ) и технологичностью при техническом обслуживании (ТО).

В настоящее время затраты на ремонт и ТО изделий общего машиностроения в 10 раз превышают затраты на их изготовление. Поэтому для обеспечения РТ в процессе проектирования определяющими факторами являются:

- снижение (или исключение) повреждаемости элементов конструкции в условиях эксплуатации;
- возможность ремонта изношенных и повреждённых деталей с применением прогрессивных технологических процессов (ТП) при ремонте;
- возможность оперативного восстановления работоспособности изделия в условиях эксплуатации путём замены (ремонта) повреждённых (выработавших ресурс) изделий или сборочных единиц (модулей);
- сокращение времени, трудоёмкости и материальных средств на ремонт и ТО.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять значения показателей долговечности, безотказности и ремонтпригодности в течение хранения и транспортировки. Основным показателем сохраняемости является её средний срок.

Контролеспособность называется свойство изделия допускать контроль его состояния в процессе эксплуатации. Контроль осуществляется при помощи датчиков оборотов, температур, вибраций и т.д., а также путём визуальных осмотров с применением оптических и других приборов.

Для обеспечения заданных в технических условиях на проектируемую машину требований по надёжности, ресурсу, металлоёмкости и другим критериям на стадии проектирования и доводки опытного экземпляра машины проводят большие экспериментальные исследования и расчёты. Они включают определение действующих нагрузок и напряжений в элементах путём тензо-метрирования моделей и опытных образцов машин в условиях эксплуатации, расчёта нагрузок методами статистической динамики, строительной механики и др., расчёта напряжённого состояния численными методами на ЭВМ (метод конечных элементов и др.).

Вероятность безотказной работы. Плотность распределения и интенсивность отказов

Время появления отказа t^* рассматривают как случайную величину. Вероятность безотказной работы за время t . $P(t) = \text{Вер}(t^* > t)$. Символ Вер означает вероятность.

Пусть в начальный момент времени работает N_0 изделий. Если к моменту времени наработки t_i исправными оказались $N_u(t_i)$, а неисправными $N^*(t_i)$ изделий, то статистическая оценка вероятности безотказной работы

$$P(t_i) = \frac{N_u(t_i)}{N_0} = 1 - \frac{N^*(t_i)}{N_0} = 1 - Q(t), \quad (3.1)$$

где $Q(t)$ — вероятность отказа изделия.

Допустим, что число изделий настолько велико, что статистическая оценка близка к истинной вероятности. Пусть за время работы $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ число отказавших изделий увеличилось на $\Delta N^*_i = N^*(t_{i+1}) - N^*(t_i)$. Вероятность отказа изделия за время Δt_i .

$$Q(t) = \text{Вер}(t_i < t^* < t_{i+1}) = \frac{N^*(t_{i+1}) - N^*(t_i)}{N_0} = \frac{\Delta N^*(t_i)}{N_0}. \quad (3.2)$$

Если отнести вероятность отказа в промежутке Δt_i к самому промежутку, то получим *плотность распределения отказов*

$$f(t_i) \approx \frac{\Delta N^*(t_i)}{N_0 \Delta t_i}. \quad (3.3)$$

Более точно плотность распределения в момент t_i ,

$$f(t_i) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N^*(t_i)}{N_0 \Delta t} = \frac{1}{N_0} \frac{dN^*}{dt}. \quad (3.4)$$

Плотность (частота) отказов (плотность вероятности отказов) представляет собой число отказов в единицу време-

ни (скорость выбывания), отнесённое к первоначальному числу изделий.

Функция распределения вероятности отказов связана с плотностью вероятности зависимостью:

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \int_0^t f(t) dt. \quad (3.5)$$

Из последнего соотношения следует:

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dP}{dt}. \quad (3.6)$$

Интенсивность отказов $A(t)$ представляет собой число отказов в единицу времени, отнесённое не к первоначальному числу изделий, а к числу изделий, находящихся в эксплуатации в данный момент:

$$\lambda(t_i) \approx \frac{1}{N_u(t_i)} \frac{\Delta N^*(t_i)}{\Delta t_i} \text{ или } \frac{1}{N_u(t)} \frac{dN^*}{dt}. \quad (3.7)$$

Если учесть, что $N_u(t_i) \Delta t_i = \Delta T_{i\Sigma}$ — суммарная наработка всех изделий за время Δt_i , то интенсивность отказов равна числу отказов в данном интервале времени, отнесённому к общей наработке изделий в этом же промежутке времени:

$$\lambda(t_i) \approx \frac{\Delta N^*(t_i)}{\Delta T_{i\Sigma}} \text{ или } \Delta T_{\Sigma} \approx \frac{\Delta N^*}{\lambda(t)}(t_i). \quad (3.8)$$

Интенсивность отказов характеризует плотность вероятности отказов в ближайший промежуток времени, если до его начала отказ ещё не произошёл.

Пример. В эксплуатацию с ресурсом 300 ч выпущена партия из 500 объектов. Число снятых объектов после различной выработки характеризуется следующими данными:

Время наработки, ч. 50, 100, 150, 200, 250, 300
Общее число снятых объектов 20, 24, 30, 34, 40, 50.

Определить плотность вероятности и интенсивность отказов в период времени от 0 до 50 ч и от 200 до 250 ч и вероятность безотказной работы за ресурс.

Решение. За первый период снято 20 объектов и плотность вероятности отказов (для середины интервала — 25 ч).

$$f(25) = \frac{20}{500 \cdot 50} \approx 0,80 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

интенсивность отказов (среднее число работающих объектов 490)

$$\lambda(25) = \frac{20}{490 \cdot 50} = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

За период от 200 до 250 ч снято 6 объектов.

Плотность вероятности отказов

$$f(225) = \frac{6}{500 \cdot 50} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Среднее число работавших объектов $500 - ((34 + 40) / 2) = 463$.

Интенсивность отказов

$$f(225) = \frac{6}{500 \cdot 50} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы за ресурс (300 ч.)

$$P(300) = 1 - \frac{50}{500} = 0,9.$$

3.3 ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Это уравнение связывает вероятность безотказной работы с интенсивностью отказов. Из уравнений (3.7) и (3.1) получаем

$$\lambda(t) = -\frac{dP}{P(t)dt} \text{ или } \frac{dP}{P(t)} = -\lambda(t)dt.$$

Интегрируя обе части равенства от 0 до t , находим

$$\ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) - \ln P(0) = - \int_0^t \lambda(t) dt. \quad (3.9)$$

Предполагая, что в начальный момент времени $t = 0$ изделие находится в исправном состоянии $P(0) = 1$, получаем из равенства (3.9)

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}. \quad (3.10)$$

Уравнение (3.10) является основным уравнением теории надёжности, так как позволяет по протеканию интенсивности отказов определить вероятность безотказной работы.

Общие закономерности изменения интенсивности отказов по времени наработки

Практически установлено, что изменение интенсивности отказов по времени для большинства сложных систем (машин, узлов) носит характер кривой, показанной на рисунке 22. Период приработки *I* характеризуется повышенным значением интенсивности отказов; при нормальной эксплуатации (*II*) интенсивность отказов уменьшается и изменяется сравнительно мало, отказы носят внезапный, случайный характер. В периоде усиленного изнашивания *III* интенсивность отказов снова резко возрастает. Поэтому перед эксплуатацией сложной системы целесообразно проводить кратковременные сдаточные испытания, отсеивающие дефекты приработки. Система, удовлетворительно прошедшая начальный период, более надёжна, чем система, находящаяся в начальном периоде. Замена старых узлов (деталей) новыми целесообразна только в период *III*. При профилактической замене деталей на новые в периоде *II* надёжность конструкции не возрастает, а уменьшается. Ресурс изделия следует назначать в начале третьего периода (периода изнашивания и старения).

Основной период эксплуатации обычно характеризуется почти постоянной интенсивностью отказов. В этом периоде

отказы происходят от случайных факторов (попадание посторонних предметов, неблагоприятное сочетание внешних факторов, усталостные разрушения и др.) и носят внезапный характер. Время появления отказа не связано с предыдущей наработкой изделия.

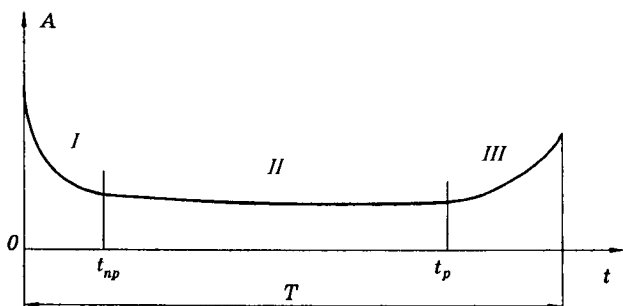


Рис. 22 Зависимость интенсивности отказов от времени выработки

1. Экспоненциальный закон надёжности

При экспоненциальном законе надёжности предполагается что, интенсивность отказов является величиной постоянной $l(t) = l$ (рис. 22). Вероятность безотказной работы по уравнению (3.10)

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.11)$$

Плотность распределения отказов

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (3.12)$$

Среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.13)$$

Исходя из (3.11) и (3.13), вероятность безотказной работы можно записать:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}. \quad (3.14)$$

Экспоненциальный закон распределения справедлив для описания потока отказов с постоянной интенсивностью. Важным свойством экспоненциального закона надёжности является то, что он относится к «нестареющим» системам. Для такого закона (и только для него!) прогнозируемая вероятность безотказной работы не зависит от предыдущей наработки:

$$P(\tau, t) = \frac{P(t + \tau)}{P(t)} = \frac{e^{-\lambda(t+\tau)}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda \tau} = e^{-\frac{\tau}{T_{cp}}}. \quad (3.15)$$

Для восстанавливаемых в процессе эксплуатации изделий вводится понятие *потока отказов*. Для потока отказов величина T_{cp} представляет собой среднюю наработку на один отказ.

Рассмотрим определение интенсивности отказов (или средней наработки на отказ) при экспоненциальном распределении.

Если известно, что для n испытуемых изделий время работы до отказа составило $t_1, t_2^*, \dots, t_n^*$, то следует принять

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i.$$

Однако на практике информация о работоспособности изделий относится к определённому времени эксплуатации, в течение которого часть изделий получила отказы, а остальные отработали его исправно.

Тогда следует принять для данного времени испытаний

$$T_{cp} = \frac{t_{\Sigma}}{K} = \frac{\text{Суммарная наработка всех изделий}}{\text{Общее число отказов}}. \quad (3.16)$$

Пример 1. Определить среднюю наработку до отказа для экспоненциального закона надёжности, если за время эксплуатации имеются следующие данные: 30 изделий отработали исправно 3000 ч, 10 изделий по 1000 ч, 7 изделий по 1500 ч; сняты три изделия после наработки соответственно 500, 2000 и 2500 ч.

Решение. Суммарное время наработки $t = 30 \cdot 3000 + 10 \cdot 1000 + 7 \cdot 1500 + 500 + 2000 + 2500 = 115,5 \cdot 10^3$ ч.

Средняя наработка на отказ

$$T = \frac{t_{\Sigma}}{K} = \frac{115,5 \cdot 10^3}{3} = 38,5 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

2. Нормальное распределение времени безотказной работы (Гаусса)

Нормальное распределение Гаусса применяют в теории надёжности для описания отказов, вызванных изнашиванием детали. Плотность распределения времени безотказной работы при нормальном законе распределения (рис. 23).

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma_t^2}}, \quad (3.17)$$

где параметры распределения $\bar{t}$ и σ_t , — среднее значение времени и среднее квадратическое отклонение.

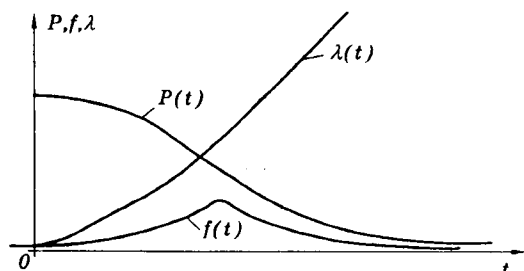


Рис. 23 Нормальное распределение времени безотказной работы

При нормальном распределении время t может быть отрицательным, что противоречит физическому смыслу.

Однако если среднее время $\bar{t}$ значительно превышает σ_t , ($\bar{t} > 3\sigma_t$), отрицательная часть распределения не имеет практического значения. Исходя из этого, функция распределения отказов

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{t - \bar{t}}{\sigma_t}\right), \quad (3.18)$$

где Φ — нормированная функция Лапласа (см. Приложение).

Вероятность безотказной работы при нормальном законе распределения

$$P(t) = 1 - Q(t) = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}}{\sigma_t}\right). \quad (3.19)$$

Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{e^{-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma_t^2}}}{\sigma_t \sqrt{2\pi} \left[\frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{t - \bar{t}}{\sigma_t}\right) \right]}. \quad (3.20)$$

При больших значениях $t (t > \bar{t} + 2\sigma_t)$ величина $\lambda(t) \approx \frac{t - \bar{t}}{\sigma_t^2}$.

При $t \rightarrow \infty$ $f(t) \rightarrow 0$, $\lambda(t) \rightarrow \infty$.

3. Распределение Вейбулла для времени безотказной работы

Это распределение используют для статистических моделей надёжности в начальный период эксплуатации («прирабочные» отказы). Функцию распределения отказов принимают в виде ($t > 0$)

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^m}. \quad (3.21)$$

Распределение Вейбулла имеет два положительных параметра: λ и m .

Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла при $m = 1$. Особенно просто по закону Вейбулла выражается вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t^m}. \quad (3.22)$$

Плотность распределения отказов

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = \lambda m t^{m-1} e^{-\lambda t^m}. \quad (3.23)$$

Интенсивность распределения отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda m t^{m-1}. \quad (3.24)$$

Если $0 < m < 1$, то интенсивность отказов со временем убывает.

3.4 НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

А) Система с последовательными элементами (рис. 24, а)

Если система включает несколько элементов, причём отказ одного из них приводит к отказу всей системы в целом, то такое соединение элементов называют последовательным (рис. 24). Например, узлы автомобиля: двигатель — механизмы трансмиссии автомобиля можно считать соединёнными последовательно, так как отказ одного из этих узлов приводит к отказу всего технического устройства в целом.

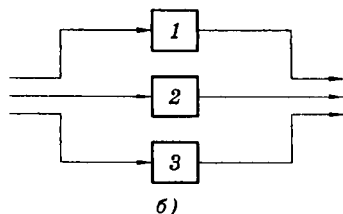
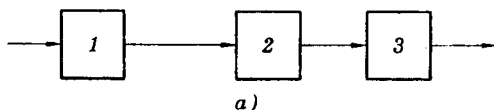


Рис. 24 Система:

а — с последовательными элементами; б — с параллельными элементами

Предполагая отказы отдельных элементов независимыми, по теореме умножения вероятностей получаем вероятность безотказной работы системы

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (3.25)$$

где $\prod_{i=1}^n$ — символ, означающий произведение величин.

При последовательном включении элементов вероятность безотказной работы уменьшается. Например, если для одного элемента $P_1 = 0,99$, то для 10 последовательно соединённых подобных элементов $P(t) = P^n = 0,99^{10} = 0,90$.

Важное свойство системы с последовательными элементами состоит в следующем. Если $\lambda_i(t)$ — интенсивность отказов i -го элемента, то для всей системы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt}, \quad \text{где } \lambda_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (3.26)$$

При последовательном соединении элементов интенсивности отказов суммируются.

Б) Система с параллельными элементами (рис. 24, б)

В этом случае отказ системы наступает только тогда, когда отказали все без исключения элементы. Вероятность отказа $Q(t) = 1 - P(t)$. Если $Q_i(t)$ — вероятность отказа i -го элемента, то

$$Q(t) = Q_1(t) Q_2(t) \dots Q_n(t).$$

Вероятность безотказной работы системы

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - (1 - P_1(t))(1 - P_2(t))\dots(1 - P_n(t)). \quad (3.27)$$

Если вероятность безотказной работы элементов одинакова и равна $P_1(t)$, то

$$P(t) = 1 - (1 - P_1(t))^n.$$

Из этого равенства можно получить $P_1(t)$, если задано $P(t)$ системы:

$$P_1(t) = 1 - \sqrt[3]{1 - P(t)}. \quad (3.28)$$

Пример 2. Определить необходимую вероятность безотказной работы элемента, если система из трёх параллельных элементов должна иметь вероятность безотказной работы (за время t) $P(t) = 0,999$.

Решение. Из уравнения (3.28) находим

$$P_1(t) = 1 - \sqrt[3]{1 - 0,999} = 0,90.$$

Из равенства (3.28) и (3.27) можно сделать вывод, что *надёжность системы с параллельными элементами значительно выше надёжности отдельного элемента.*

Параллельное соединение — метод создания надёжной системы из «ненадёжных» элементов. Систему, содержащую параллельно работающие элементы, называют системой с резервированием.

Применяют три метода резервирования:

- 1) система с нагруженным («горячим») резервом;
- 2) система с облегчённым резервом;
- 3) система с ненагруженным («холодным») резервом.

В первом случае резервный элемент работает в одинаковых условиях с основным (например, многодвигательный самолёт).

Во втором случае резервный элемент работает в облегченных условиях, в третьем случае он включается в работу только после отказа основного элемента.

Таким образом, *в системах с последовательно соединёнными элементами вероятность безотказной работы определяют перемножением вероятностей безотказной работы элементов, а в системе с параллельным соединением — вероятность отказа перемножением вероятностей отказа элементов.*

Целесообразность применения различных схем резервирования зависит от особенностей функционирования системы, назначения элементов и других факторов. Если для включения элемента на заданную мощность требуется зна-

чительное время, то возможности использования холодного резерва становятся ограниченными.

В) Примеры расчёта надёжности систем с резервированием

Если требуется высокая надёжность системы, состоящей из многих элементов, то повышением надёжности элементов часто не удаётся ограничиться и приходится применять резервирование, которое позволяет уменьшить вероятность отказов на несколько порядков. В машиностроении применяют все методы резервирования.

Особенности резервирования в машиностроении: в некоторых системах резервные агрегаты используют как рабочие в часы пик; в ряде систем резервирование обеспечивает сохранение работоспособности, но с пониженными показателями. Применение запасных деталей также можно рассматривать как вид резервирования. В общем машиностроении в ответственных узлах используют двойную систему смазки, двойные и тройные уплотнения.

В транспортных машинах, в частности в автомобилях, применяют двойную или тройную систему тормозов. В пассажирских самолётах применяют 3-4 двигателя и несколько электрических машин. Выход из строя одной или даже нескольких машин, кроме последней, не приводит к аварии самолёта. В морских судах — по две машины. Число эскалаторов, паровых котлов выбирают с учётом возможности отказа и необходимости ремонта. При этом в часы пик могут работать все эскалаторы. В станках применяют запасные комплекты специальных инструментов. На заводах уникальные станки основного производства стараются иметь по два или более. В автоматическом производстве применяют накопители, станки-дублиеры и даже дублирующие участки автоматических линий.

При постоянном резервировании резервные элементы или цепи подключают параллельно основным (рис. 25, а). Вероятность отказа всех элементов (основного и резервных) по теореме умножения вероятностей

$$Q_{cm}(t) = Q_1(t)Q_2(t)\dots Q_n(t) = \prod_1^n Q_i(t), \quad (3.29)$$

где $Q_i(t)$ — вероятность отказа элемента i . Вероятность безотказной работы:

$$P_{cm}(t) = Q_1(t)Q_2(t) = 1 - Q_{cm}(t)$$

Если элементы одинаковы, то

$$P_{cm}(t) = Q_1^n(t) \text{ и } P_{cm}(t) = 1 - Q_1^n(t). \quad (3.30)$$

Например, если $Q_1 = 0,01$ и $n = 2$ (дублирование) $P_{cm} = 0,9999$, если $Q_i = 0,01$ и $n = 3$ (двойное резервирование) $P_{cm} = 0,999999$.

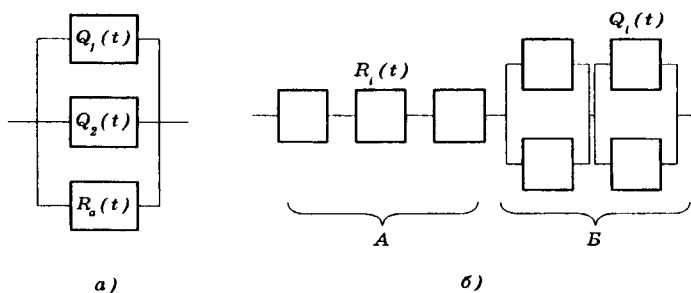


Рис. 25 Система со смешанным резервированием

Если в системе (рис. 25, б) А элементов не дублированы, а Б элементов дублированы, то надёжность системы

$$P_{cm}(t) = P_A(t)P_B(t),$$

$$\text{где } P_A(t) = \prod_1^A P_i(t) \quad P_B(t) = \prod_1^B [1 - Q_i^2(t)]. \quad (3.31)$$

Если в системе несколько основных и несколько резервных элементов, причём все элементы постоянно включены и работают параллельно, то вероятность сохранения работоспособности системы определяется с помощью биномиального распределения. Степень бинома берут равной общему числу параллельно работающих элементов. Например, если в системе предусмотрены два основных и один резервный элемент, то используют разложение бинома тре-

твей степени. Вероятность сохранения работоспособности системы представляется первыми двумя членами, из которых первый выражает вероятность безотказности всех трёх элементов, а второй — вероятность безотказности двух элементов и отказа третьего.

При резервировании замещением резервные элементы включаются только при отказе основных. Это включение может производиться автоматически или вручную. К резервированию замещением можно отнести применение резервных агрегатов и блоков инструментов, устанавливаемых взамен отказавших, причём эти элементы тогда рассматривают входящими в систему.

Для основного случая экспоненциального распределения отказов при малых значениях λt , т.е. при достаточно высокой надёжности элементов, вероятность отказа системы (рис. 25, а)

$$Q_{cm}(t) \approx \frac{\prod_1^n Q_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod_1^n \lambda_i t}{n!}. \quad (3.32)$$

Если элементы одинаковы, то

$$Q_{cm}(t) \approx \frac{Q^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda t)^n}{n!},$$

где $n!$ — факториал ($n! = n_1 \cdot n_2 \dots n$).

Формулы справедливы при условии, что переключение абсолютно надёжно. При этом вероятность отказа в $n!$ раз меньше, чем при постоянном резервировании. Меньшая вероятность отказа понятна, так как меньшее количество элементов находится под нагрузкой. Если переключения недостаточно надёжно, то выигрыш может быть легко утерян.

Применяют резервированные системы, в которых отказы (в пределах числа резервных элементов) устанавливают при периодических проверках, и системы, в которых отказы регистрируются при их появлении. Для поддержания высокой надёжности резервированных систем отказавшие элементы следует восстанавливать или заменять.

В первом случае система может начать работать с отказавшими элементами. Тогда расчёт на надёжность ведут за период от последней проверки. Если предусмотрено немедленное обнаружение отказов и система продолжает работать во время замены элементов или восстановления их работоспособности, то оценку надёжности ведут за время от отказа до окончания ремонта.

Эффективность разных схем резервирования проиллюстрируем на основной системе из четырёх последовательно соединённых элементов с вероятностью безотказной работы каждого 0,9 (рис. 26).

Вероятность безотказной работы системы без резервирования (рис. 27, а)

$$P_{cm}(t) = P_1^4(t) = 0,9^4 = 0,65 \text{ и } Q_{cm}(t) = 0,35,$$

дублированной системы с постоянным резервом в виде такой же системы (рис. 27, б)

$$P_{cm}(t) = 1 - Q_{cm}^2(t) = 1 - 0,35^2 = 0,88.$$

Системы дублированной ненагруженной резервом и вполне надёжным переключением

$$P_{cm}(t) \approx 1 - \frac{Q_{cm}^n(t)}{n!} \approx 1 - \frac{0,35^2}{2} \approx 0,94.$$

Система с независимым постоянным дублированием каждого элемента (рис. 26, в)

$$P_{cm}(t) = [1 - Q_1^2(t)]^4 = (1 - 0,1^2)^4 \approx 0,96,$$

такой же системы с независимым ненагруженным дублированием

$$P_{cm}(t) \approx \left[1 - \frac{Q_1^2(t)}{n!} \right]^4 \approx \left[1 - \frac{0,1^2}{2} \right]^4 \approx 0,98.$$

Пример наглядно показывает, что поэлементное резервирование гораздо эффективнее, чем общее, а резервирование замещением при совершенно надёжном переключении эффективнее, чем постоянное.

В автоматических линиях, как известно, часто применяют накопители, которые разбивают линии на отдельные участки, причём отказ какого-нибудь элемента (станка) вызывает остановку не всей линии, а только одного участка. В это время другие участки продолжают работу, получая заготовки от накопителя или подавая заготовки в накопитель.

Если систему рассматривать как технологическую, поставить в середине накопитель высокой надёжности (рис. 26, *г*), то вероятность безотказной работы поднимется с 0,65 до величины, несколько меньшей 0,81. При этом вероятность безотказной работы линии меньше этой вероятности для последнего участка и приближается к ней при увеличении ёмкости накопителя. Вероятность длительной

безотказной работы линии меньше вероятности для лимитирующего участка.

Практика эксплуатации технических систем показывает, что их надёжность по мере увеличения общей наработки парка изделий в эксплуатации возрастает. Это происходит в результате внесения конструктивных и технологических изменений в производство изделий, направленных на устранение

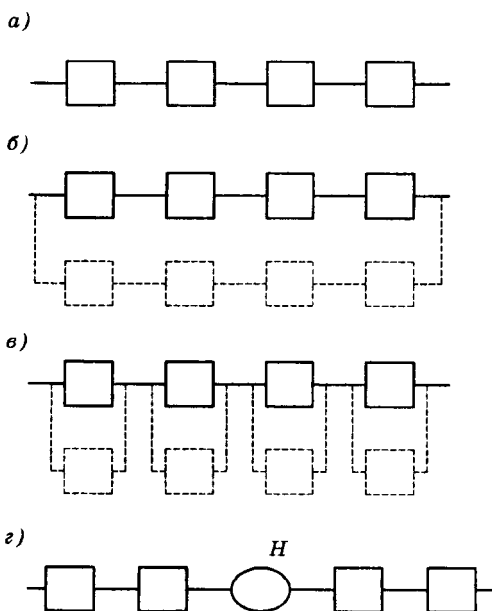


Рис. 26 Примеры резервирования систем различного вида

отказов. При очень большой наработке (или времени эксплуатации) наступает «старение» парка изделий и наблюдается стабилизация, а затем и понижение уровня надежности.

3.5 КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

В качестве основных показателей надёжности восстанавливаемых изделий обычно используют следующие: вероятность безотказной работы $P(t)$ и наработку на отказ T .

Для ремонтируемых (восстанавливаемых) изделий величина T представляет среднюю наработку между отказами. Она определяется в рассматриваемом интервале времени

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i}, \quad (3.33)$$

где N — число изделий в статистической совокупности (выборке); t_i и m_i — наработка и число отказов i -го изделия в рассматриваемом интервале времени соответственно.

Для отказов, не устраняемых в эксплуатации, в качестве показателя надёжности используют среднюю наработку до первого отказа T_{cp} . Среднюю наработку до отказа определяют отдельно для отказов различных типов. Например, для пассажирских авиационных двигателей средняя наработка до отказа в полёте составляет обычно $T_{o.n} \approx (2 \div 8) \cdot 10^4$ 1/ч, тогда как средняя наработка на один досрочно снятый двигатель

$T_{дсд} \approx (1 \div 6) \cdot 10^3$ 1/ч. Указанные характеристики отражают различные характеристики эксплуатации; величина $T_{дсд}$ является, в сущности, экономическим показателем.

У невосстанавливаемых изделий рассматривают только первичные отказы, у восстанавливаемых — первичные и повторные отказы. Все рассуждения и термины для невос-

становливаемых изделий распространяются на первичные отказы восстанавливаемых изделий.

Совместное действие внезапных и износowych отказов

На рисунке 27 показаны кривые вероятности отсутствия внезапных отказов $P_o(t)$, износowych отказов $P_u(t)$ и кривая вероятности безотказной работы при совместном действии внезапных и износowych отказов. Вначале, когда интенсивность износowych отказов низка, кривая $P(t)$ следует кривой $P_o(t)$, а потом резко снижается. В период износowych отказов их интенсивность, как правило, многократно выше, чем внезапных.

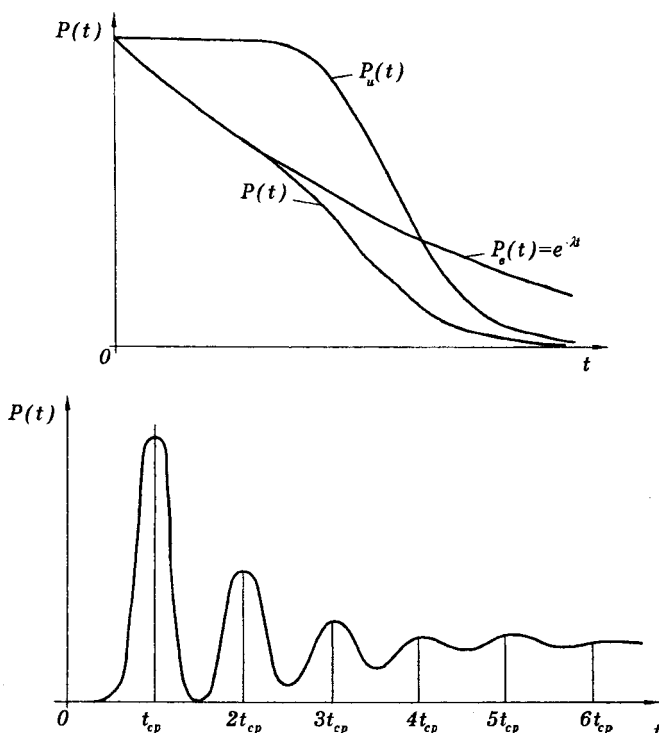


Рис. 27 Кривые вероятности безотказной работы при совместном действии внезапных и износowych отказов

Вероятность безотказной работы за период t по теореме умножения вероятностей

$$P(t) = P_s(t) P_u(t),$$

где $P_s(t) = e^{-\lambda t}$; $P_u(t) = \frac{P(T+t)}{P(t)}$ — вероятности отсутствия внезапных и, соответственно, износных отказов.

Для системы из последовательно соединённых элементов вероятность безотказной работы за период t , если до этого она проработала время T

$$P_{cm}(t) = e^{-t \sum \lambda_i} \prod \frac{P_{ui}(T+t)}{P_{ui}(T)}, \quad (3.34)$$

где знаки Σ и Π означают сумму и произведение. Для новых изделий $T = 0$ и $P_{ui}(T) = 1$.

У восстанавливаемых изделий свойство безотказности часто характеризуется средним числом отказов $m_{cp.om}$, отнесённым к одному изделию, и частотой отказов (или параметром потока отказов)

$$\Lambda(t) = \frac{dm_{cp.om}(t)}{dt}. \quad (3.35)$$

Частота отказов аналогична интенсивности отказов, но учитывает повторные отказы. Для восстанавливаемых изделий с течением времени периоды работы между ремонтами становятся короче, а периоды ремонта и профилактики возрастают.

В сложных изделиях (системах) параметр $\Lambda(t)$ — суммарная частота отказов рассматривается как сумма частот отказов. Составляющие потоки можно рассматривать по узлам, по типам устройств, например механическим, гидравлическим, электрическим и др.

$$\Lambda(t) = \Lambda_1(t) + \Lambda_2(t) + \dots$$

Соответственно средняя наработка на отказ изделия

$$T_{cp} = 1/\Lambda,$$

где

$$1/T_{cp} = 1/t_{cp1} + 1/t_{cp2} + \dots \quad (3.36)$$

Рассмотрим случай, когда профилактическая замена элементов для предотвращения износных отказов не предусматривается, а элементы заменяют только после их отказов.

На графике частоты отказов по времени (рис. 28) наблюдаются максимумы соответственно среднему сроку службы первого, второго и третьего поколений элементов. Дисперсии каждого последующего поколения резко возрастают по сравнению с предыдущим. Кривые частоты отказов накладываются друг на друга и приближают суммарную частоту отказов к постоянной $\Lambda(t) = \Lambda = 1/t_{cp}$, которая гораздо больше, чем в период действия только внезапных отказов. Вероятность безотказной работы подчиняется экспоненциальному распределению: $P(t) = e^{-\Lambda t}$.

Для системы из последовательно соединенных элементов $P_{cm}(t) = e^{-t \sum \lambda_i}$.

Определение оптимальной долговечности восстанавливаемых изделий

Долговечность ремонтируемых машин может быть физически неограниченной, так как детали поочерёдно ремонтируются или заменяются. Однако со временем эксплуатации время ремонта и стоимость технического обслуживания растут, межремонтные периоды и производительность падают.

Универсальным критерием при расчёте оптимальной долговечности технологических машин может быть себестоимость изготовления изделий. Введём следующие обозначения:

C_0, C_1, C_2, C_3 — начальная стоимость и стоимости капитальных ремонтов;

t_1, t_2, t_3 — межремонтные периоды в часах;

n_1, n_2, n_3 — часовая производительность;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — средняя стоимость технического обслуживания за 1ч;

S_1, S_2, S_3 — себестоимость единицы продукции (кроме стоимости материалов).

Тогда себестоимость единицы продукции, выпускаемой машиной при эксплуатации её до первого капитального ремонта,

$$S_1 = \frac{C_0 + \gamma_1 t_1}{n_1 t_1}.$$

Аналогично, до второго ремонта

$$S_2 = \frac{C_0 + \gamma_1 t_1 + C_1 + \gamma_2 t_2}{n_1 t_1 + n_2 t_2}.$$

То же, до третьего ремонта

$$S_2 = \frac{C_0 + \gamma_1 t_1 + C_1 + \gamma_2 t_2 + C_3 + \gamma_3 t_3}{n_1 t_1 + n_2 t_2 + n_3 t_3}.$$

Обычно $S_1 > S_2$, но, начиная с некоторого оптимального числа капитальных ремонтов, себестоимость изделий начинает существенно возрастать. Эта величина может служить критерием оптимальности процессов восстановления изделия.

Расчёт числа изделий, находящихся в эксплуатации

Для расчёта используют экспоненциальный закон надёжности. Если $T_{дс}$ — средняя наработка до выбывания изделия из эксплуатации (в ремонт или на списание), то в момент времени t число изделий в эксплуатации

$$N_H(t) = N_0 e^{\frac{t}{T_{дс}}}. \quad (3.37)$$

Число «убывших» изделий

$$N(t) = N_0 \left(1 - e^{\frac{t}{T_{дс}}} \right). \quad (3.38)$$

В последних формулах N_0 — число изделий, поступивших в начальный момент времени $t = 0$.

На рисунке 28 приведена «кривая убыли» — зависимость относительного числа вышедших изделий от времени наработки. При

$$t = T_{\text{дс}} \frac{N^*}{N_0} = 1 - e^{-1} = 0,63.$$

Это означает, что 63 % изделий будут сняты с эксплуатации и направлены в ремонт.

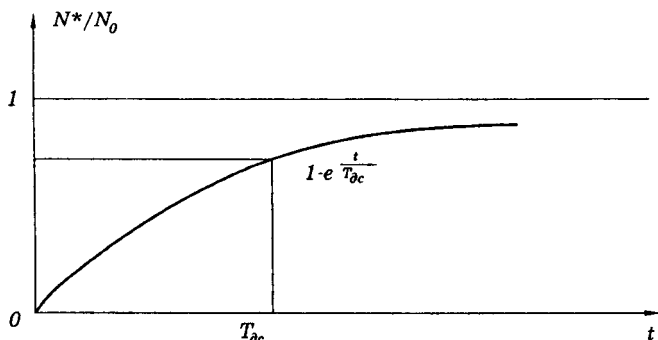


Рис. 28 «Кривая убыли» изделий из эксплуатации

3.6 ТЕОРИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ В СТРУКТУРЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

В стадии формирования находится теория долговечности, как узкая часть теории надежности, предметом которой является:

- определение технически и экономически целесообразных лимитов долговечности; определение степени использования машин в эксплуатации;
- разработка методов изучения эксплуатации машин (статистическая обработка эксплуатационной информации); изучение эксплуатационных режимов и их влияния на долговечность машин, типизация средств эксплуатационных режимов;

- диагностика причин разрушения, выявление деталей, лимитирующих долговечность, изучение влияния долговечности деталей на долговечность машин в целом;
- разработка методов стендовых и полевых испытаний машин, узлов и деталей на долговечность, прогноз эксплуатационной долговечности машины на основании стендовых испытаний.

Многочисленность и разнородность факторов, влияющих на долговечность (технический уровень эксплуатации, колебания эксплуатационных режимов, качество изготовления и т.д.), неопределённость многих факторов (рассеивание характеристик прочности материалов, влияние региональных и климатических условий и т.п.) заставляют при определении долговечности прибегать к методам теории вероятности и математической статистики. Вследствие этого теория не даёт однозначного ответа на вопрос об ожидаемой долговечности, ограничиваясь установлением функциональных зависимостей вероятности разрушения от продолжительности и режимов эксплуатации (рис. 29). Теория может только установить, что вероятная продолжительность работы машины на данном режиме будет равна, скажем, 8, 12 и 18 тыс. ч при вероятности неразрушения соответственно 90, 80 и 60 %, или установить вероятное число остающихся в эксплуатации машин после определённых периодов работы.

Разработка нормативов долговечности представляет сложную задачу и требует сбора и обработки большого объёма информации. Должны быть учтены вид и объём разрушений, т.е. установлено с известной степенью достоверности, подвергаются ли разрушению жизненно важные или второстепенные детали и узлы, сохраняется ли ремонтпригодность машин, каковы вероятный объём и стоимость ремонтов? С этих позиций долговечность можно определить как вероятную продолжительность работы машины на регламентированном режиме, при которой возможный выход машины из строя не больше заданного условного предела

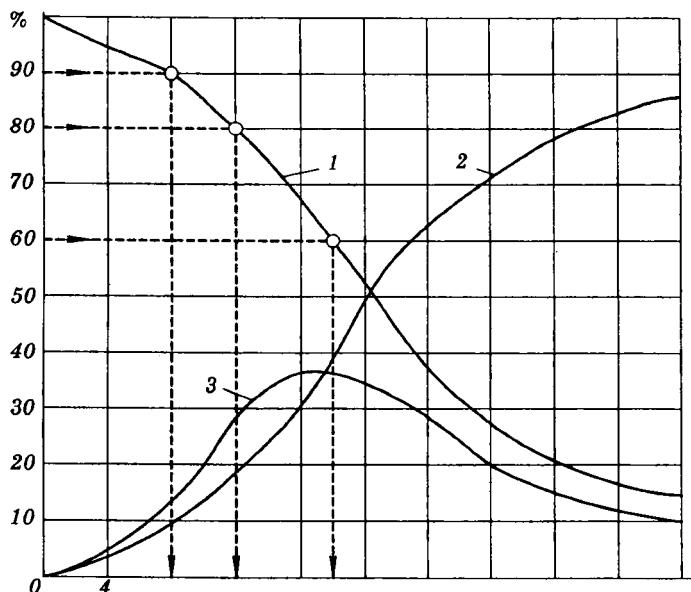


Рис. 29 График вероятной долговечности: 1 — вероятный срок службы (процент выживания); 2 — вероятность разрушения; 3 — плотность вероятностей срока службы

(например, 10 %) при сохранении ремонтпригодности и вероятной стоимости ремонта, не превышающей определённого значения, выраженного, допустим, в процентах от стоимости машины.

Выводы, основанные на изучении машин, находящихся в эксплуатации, относятся к машинам выпуска прошлых лет и всегда *запаздывают*, будучи по существу неприложимы к машинам новых выпусков, подвергаемых конструктивным и технологическим усовершенствованиям. Прогноз долговечности новых машин, являющийся насущной практической задачей, приходится базировать на стендовых испытаниях машин (или вводимых в них новых узлов).

Таким образом, одним из важнейших разделов теории долговечности является разработка методов ускоренных

испытаний и корреляция результатов испытаний с эксплуатационными условиями.

В качестве общего замечания можно указать, что изучение долговечности машин было бы легче, если их в виде обязательной меры оборудовать работомерами, т.е. суммарными счётчиками отработанных часов или числа проделанных операций (подобно счётчикам километража, устанавливаемым на автомобилях). Эту меру следовало бы сделать обязательной для всех машин новых выпусков.

Критерии долговечности. *Долговечность есть общее время, которое машина может отработать на номинальном режиме в условиях нормальной эксплуатации без существенного снижения основных расчётных параметров.* Иногда применяют понятие «ресурс машины» (время работы машины в часах до первого капитального ремонта).

Во многих случаях, особенно для агрегатов непериодического действия, долговечность измеряют показателями суммарной выработки за всё время функционирования агрегата. Определённая таким образом долговечность представляет собой *общее число операций или единиц работы, которые может произвести машина или агрегат до предельного износа.* Так, долговечность автотранспорта и подвижного железнодорожного состава определяют по предельному суммарному пробегу в километрах; приборов и испытательных машин — по общему числу включений; плавильных агрегатов — по суммарному числу плавок; почвообрабатывающих машин — по количеству обрабатываемых гектаров почвы.

Фактическая долговечность может значительно отличаться от номинальной в зависимости от условий работы. Она уменьшается при систематической перегрузке машины, работе на повышенных скоростях, режимах, увеличении рабочей нагрузки, в неблагоприятных климатических условиях. При облегчённых условиях работы долговечность машин возрастает.

Влияние условий работы на долговечность можно учесть введением *коэффициента режима $\eta_{РЕЖ}$* . Коэффициент ре-

жима можно достоверно определить путём дифференцированного изучения условий и режимов эксплуатации и их влияния на долговечность, что составляет задачу статистической теории надёжности. При отсутствии уточнённых данных можно в качестве первого приближения принимать: для средних условий эксплуатации $\eta_{РЕЖ} = 1$; тяжёлых — 1,2–1,5; лёгких — 0,7–0,8.

Фактическая долговечность

$$D = \frac{D_{ном}}{\eta_{реж}}, \quad (3.39)$$

где $D_{ном}$ — номинальная (расчётная) долговечность.

Срок службы машины — это общая продолжительность пребывания её в эксплуатации (в годах) до исчерпания ресурса долговечности. Для машин непериодического действия срок службы определяется как частное от деления долговечности, выраженной числом операций (единиц работы), на их среднее число в году.

Например, срок службы автомобиля, рассчитанного на суммарный пробег L км,

$$H = \frac{L}{l \cdot \eta_{реж}},$$

где $\eta_{реж}$ — коэффициент режима; l — средний километраж, проходимый автомобилем в год.

Для машин, долговечность которых исчисляют в единицах времени, срок службы (в годах) равен частному от деления долговечности D на коэффициент использования $\eta_{исп}$, характеризующий среднюю за период работы машины степень фактического ее использования за вычетом всего холостого времени.

С учетом коэффициента режима

$$H = \frac{D}{\eta_{исп} \cdot \eta_{реж}}. \quad (3.40)$$

Коэффициент использования в общем случае

$$\eta_{исп} = \eta_{сез} \cdot \eta_{вых} \cdot \eta_{рем} \cdot \eta_{см} \cdot \eta_{маш} \cdot \eta_{заг} \cdot \eta_{пр}. \quad (3.41)$$

Коэффициент сезонности $\eta_{сез}$ — отношение продолжительности $h_{сез}$ сезона работы машины к общему числу дней в году:

$$h_{ср} = \frac{h_{сез}}{365}.$$

К числу машин, продолжительность действия которых ограничена климатическими и сезонными условиями, принадлежат большинство сельскохозяйственных машин, дорожные, снегоуборочные машины, судовой транспорт с ограниченным периодом навигации.

Для некоторых категорий машин (специализированные сельскохозяйственные машины, например, зерно-картофельуборочные)

$$\eta_{сез} = 0,05 - 0,20.$$

Для машин, используемых круглый год,

$$\eta_{сез} = 1.$$

Коэффициент выходных дней $\eta_{вых}$ — отношение числа рабочих дней в году к общему числу дней в году. При пятидневной рабочей неделе число рабочих дней $52 \cdot 5 = 260$, а за вычетом праздничных дней — 250 дней. Следовательно,

$$\eta_{вых} = 250/365 = 0,68.$$

Этот коэффициент действителен для машинного оборудования, работающего по календарному режиму. Для агрегатов, работающих непрерывно в течение всего года (доменные агрегаты, оборудование теплосиловых станций), $\eta_{вых} = 1$.

Коэффициент сменности $\eta_{см}$ — отношение продолжительности $h_{см}$ смен в часах, в течение которых работает машина, к числу часов в сутках:

$$\eta_{см} = h_{см} / 24.$$

При 8-часовом рабочем дне и одно-, двух- и трёхсменной работе соответственно

$$\eta_{с.м} = 0,33; 0,66 \text{ и } 1.$$

Коэффициент ремонтных простоев $\eta_{рем}$ — среднее отношение продолжительности h_{ϕ} фактической работы машины к сумме продолжительности фактической работы и продолжительности $h_{рем}$ простоев машин в ремонте:

$$\eta_{рем} = \frac{h_{\phi}}{h_{\phi} + h_{рем}}.$$

Этот коэффициент зависит в первую очередь от надёжности машины, определяющей длительность межремонтных сроков и объём ремонтных работ, а также от уровня организации ремонта. Величина $\eta_{рем}$ определяется также длительностью пребывания машины в эксплуатации. Будучи незначительными на первых этапах эксплуатации, ремонтные простои прогрессивно возрастают по мере износа машины и к концу срока службы могут достигать больших значений.

Для технологических машин, работающих по календарному режиму, в среднем

$$\eta_{рем} = 0,85 \div 0,95.$$

Для других категорий машин цифры варьируют в широких пределах. Для машин сезонного и резко непериодического действия $\eta_{рем} = 1$, так как эти машины ремонтируются почти всегда в периоды их бездействия.

Коэффициент машинного времени $\eta_{маш}$ — отношение машинного времени $h_{маш}$ (времени фактической работы) к сумме машинного и вспомогательного времени $h_{всп}$ (времени, затрачиваемого на установку и снятие изделий, настройку и регулировку машины, обслуживание и уход):

$$\eta_{маш} = \frac{h_{маш}}{h_{маш} + h_{всп}}.$$

Этот коэффициент действителен для машин-орудий с ручным управлением, обслуживаемых операторами (например, металлообрабатывающие станки, кузнечно-прессовое оборудование). Величина $h_{\text{маш}}$ зависит от типа оборудования, совершенства организации рабочего процесса, размеров партий обрабатываемых изделий. Для металлорежущих станков в среднем $\eta_{\text{маш}} = 0,8 \div 0,9$.

С увеличением степени автоматизации величина $\eta_{\text{МШ}}$ приближается к единице.

Коэффициент загрузки $\eta_{\text{заг}}$ — отношение $h_{\text{ф}}$ продолжительности фактической работы машины к сумме фактической работы машины и холостого времени $h_{\text{хол}}$ — простоев за тот же период, вызванных производственной невозможностью обеспечить полную загрузку машины:

$$\eta_{\text{заг}} = \frac{h_{\text{ф}}}{h_{\text{ф}} + h_{\text{хол}}}.$$

Низкий коэффициент $\eta_{\text{заг}}$ имеют машины, работающие вне часового графика, и машины непериодического действия с нерегламентированной загрузкой (вспомогательные, аварийные, ремонтные). В условиях непрерывного производства недогруженными бывают специализированные машины, выполняющие узкий круг операций при изготовлении деталей ограниченной номенклатуры, и машины, производительность которых превышает среднюю производительность смежного машинного оборудования. Как правило, низкое значение коэффициента $\eta_{\text{заг}}$ у технологических машин является следствием дефектов производственного планирования, неправильного подбора оборудования по численности, типу и производительности, а также нестабильности профиля продукции.

В производствах со сменяющимися объектами величина $\eta_{\text{заг}}$ зависит от типа объекта, находящегося в данный момент в производстве, характера обработки его деталей и может изменяться во времени. Например, при обработке деталей с преобладанием токарных операций будут загруз-

жены станки токарной группы; другие станки (фрезерные, расточные) будут недогружены или простаивать.

В мелкосерийном производстве $\eta_{заг} = 0,7 \div 0,75$; в серийном $0,8 \div 0,85$; в крупносерийном $0,9 \div 0,95$. При непрерывно-поточном массовом, стабильном во времени производстве $\eta_{заг} = 1$.

Коэффициент вынужденных простоев η_{np} — среднее отношение продолжительности фактической работы машины h_{ϕ} к сумме h_{ϕ} и времени h_{np} простоев, вызванных неполадками и неисправностями, устраняемыми на месте:

$$\eta_{np} = \frac{h_{\phi}}{h_{\phi} + h_{np}}.$$

Значение этого коэффициента для надёжно выполненных и правильно эксплуатируемых машин близко к единице. У машин с дефектами конструкции или работающих при неквалифицированном обслуживании η_{np} может быть значительно меньше единицы.

Расчётная долговечность. Для машин, работающих по календарному режиму, степень использования, а следовательно, и соотношение между периодом службы H и долговечностью D зависит преимущественно от коэффициента сменности $\eta_{см}$.

Примем в формуле (3.41) $\eta_{рем} \cdot \eta_{заг} \cdot \eta_{np} = 0,8$; $\eta_{вых} = 0,7$ (за исключением случая круглогодичной непрерывной работы, когда $\eta_{вых} = 1$).

Тогда $\eta_{исп} = 0,8 \cdot 0,7 \cdot \eta_{см} = 0,56 \cdot \eta_{см}$ и долговечность по формуле (3.40)

$$D = 0,56 \cdot \eta_{см} H. \quad (3.42)$$

С учётом формулы (3.42) составлен график (рис. 30) зависимости D (в тыс. ч) от срока H в логарифмической системе координат.

Для работы в одну, две и три смены принято соответственно $\eta_{см} = 0,33$; 0,666 и 1.

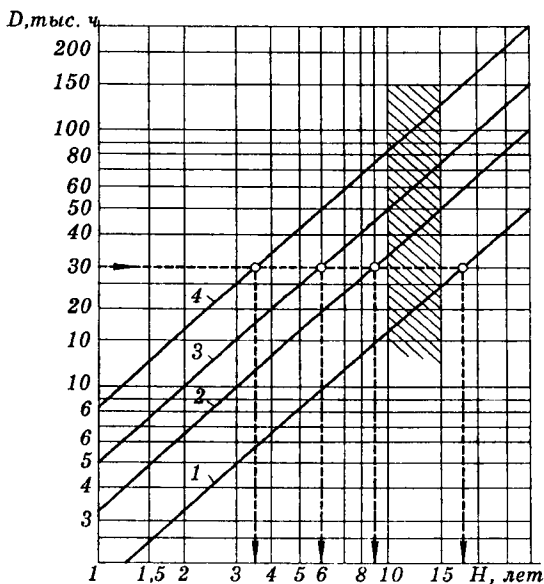


Рис. 30 Расчётная долговечность D в зависимости от срока службы H при односменной (1), двухсменной (2) трёхсменной (3) и круглогодичной (4) работе

Для круглогодичной работы принято с учётом вынужденных простоев $D = 0,95H$.

Графиком можно пользоваться для ориентировочного определения долговечности машин, работающих по календарному режиму. Для наиболее распространённого случая работы в две смены при сроке службы 10–15 лет (заштрихованная область) расчётная долговечность составляет 30–50 тыс. ч. Эти цифры можно брать за основу расчёта большинства технологических машин. Для машин, работающих в три смены, при том же сроке службы $D = 50–70$ тыс. ч, а для машин, работающих круглый год, $D = 80–130$ тыс. ч.

График позволяет решить и обратную задачу — по заданной долговечности определить срок службы. Например, при $D = 30$ тыс. ч (штриховая линия) сроки службы при круглогодичной работе в одну, две и три смены равны соответственно 3,6; 6,2; 9,2 и 18,5 лет.

Таким образом, ресурс долговечности, закладываемый в машину, должен быть согласован со степенью её использования. Повышение долговечности машин, мало загруженных в эксплуатации, сопровождается увеличением срока службы, которое практически нельзя использовать из-за наступления технического устаревания. При $D = 10$ лет период службы, согласно формуле (3.30), равен для двухсменной работы 27 лет, а для односменной 54 года, что превосходит все мыслимые пределы технико-экономической долговечности.

Теория долговечности, строящая выводы на статистических данных, в сущности, приложима к изделиям массового производства и в гораздо меньшей степени — к изделиям мелкосерийного и тем более единичного выпуска. Долговечность машины, подобно полезной отдаче, очень зависит от условий и технического уровня эксплуатации. Бережное отношение к машине, квалифицированный уход, своевременная профилактика, предупреждение перегрузок — всё это может значительно повысить долговечность машины. Низкий уровень обслуживания сокращает срок службы машины.

В описанной выше трактовке теория долговечности исходит из феноменологических позиций, учитывая данные достигнутой долговечности. Гораздо большее значение имеет разработка методов повышения долговечности. Здесь на первый план выдвигается задача изучения физических закономерностей разрушения, износа и повреждения деталей (в зависимости от вида нагружения, свойств материала, состояния поверхностей и т.д.). Задачи эти настолько дифференцированы и специфичны, что уместить их в рамках только общей теории долговечности едва ли возможно. Они решаются методами теории прочности, теории износа, а главным образом, целенаправленной научной, конструкторской и технологической работой над повышением долговечности.

3.7 НАДЁЖНОСТЬ В КОНСТРУКТОРСКИХ РАСЧЁТАХ НА ПРОЧНОСТЬ

Основные факторы, лимитирующие надёжность деталей машин, следующие: поломки деталей; износ трущихся поверхностей; повреждения поверхностей в результате действия контактных напряжений, наклёпа и коррозии; пластические деформации деталей, вызываемые местным или общим переходом напряжений за предел текучести или (при повышенных температурах) ползучестью.

Прочность в большинстве случаев не является непреодолимым лимитом. В машинах общего назначения возможно полное устранение поломок. При существующем в настоящее время ассортименте машиностроительных материалов, при существующих методах изготовления, при современном состоянии науки о прочности в этом классе машин нет деталей, которым нельзя было бы придать практически неограниченную долговечность.

Многие факторы случайности можно свести к минимуму: производственные (колебания механических характеристик материала, технологические дефекты) — тщательным контролем изделий на всех этапах изготовления; эксплуатационные (перегрузки, неправильное обращение с машиной) — чисто конструктивными мерами (введением систем защиты, предохранителей, блокировок).

В случае машин напряжённого класса, вроде транспортных, задача сложнее. Требования уменьшения габаритных размеров и массы заставляют повышать расчётные напряжения, вследствие чего вероятность поломок увеличивается. Однако непрерывное совершенствование упрочняющей технологии и уточнение методов расчёта позволяют и в данном случае значительно повысить прочность деталей, а следовательно, и долговечность машины в целом.

В наихудшем положении находятся тепловые машины, долговечность которых зависит в первую очередь от стойкости деталей, работающих при высоких температурах.

Прочность материалов резко снижается с увеличением температуры. Кроме того, при повышенных температурах возникает явление ползучести (пластическое течение материала под действием сравнительно небольших напряжений), приводящее к изменению первоначальных размеров детали и, как следствие, к утрате её работоспособности.

Детали, работающие при высоких температурах, рассчитывают на ограниченную долговечность. Срок их службы можно только повысить конструктивными приёмами (снижением уровня напряжений, рациональным охлаждением) и, главным образом, применением жаропрочных материалов. В последнее время для изготовления термически напряжённых деталей применяют металлокерамические (спечённые) материалы (керметы) на основе оксидов, нитридов и боридов Ti, Cr, Al, карбидов и нитридов B и Si, со связкой из металлов Ni, Co, Mo.

Длительное время в машиностроительной практике в качестве основного существовал, а в некоторых случаях используются и в настоящее время, метод расчёта на прочность, принятый в расчётах деталей машин. Он основан на сравнении рабочих напряжений σ_p с допускаемыми $[\sigma]$, определяемыми по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{lim}}{[n]},$$

где σ_{lim} — предельное напряжение, при достижении которого рабочими напряжениями нарушается работоспособность конструкции (происходят разрушения, недопустимая пластическая деформация, потеря устойчивости и т.д.);

$[n]$ — нормативное значение коэффициента запаса прочности.

Прочность детали при линейном напряжённом состоянии считается обеспеченной, если выполняется неравенство

$$\sigma_p \leq [\sigma]. \quad (3.43)$$

Обычно допускается в случае необходимости небольшое (до 5 %) превышение σ_p над $[\sigma]$.

В случае плоского или объёмного напряжённого состояния условие прочности выражается с помощью гипотез прочности (см. «Соппротивление материалов»).

По гипотезе максимальных касательных напряжений (третьей) условие прочности представляется в виде

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \leq [\tau] = \frac{[\sigma]}{2}, \quad (3.44)$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ — главные нормальные напряжения. При действии одновременно нормального σ и касательного τ напряжений из (3.44) получают условие

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq [\sigma].$$

Из этой гипотезы, в частности, следует, что если $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ и $\sigma_3 = 0$, то σ_2 на условие прочности не влияет.

По гипотезе энергии формоизменения (четвёртой) условие прочности имеет вид

$$\sigma_{экр} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma]. \quad (3.45)$$

При действии σ и τ это условие приобретает вид

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma].$$

Эти гипотезы приводят к незначительной разнице (не более 15 %) в расчётных напряжениях или усилиях и применяются для расчёта на прочность деталей из пластичных материалов, разрушающихся вязко.

При расчёте деталей из хрупких материалов (например, из серого чугуна) расчёт на прочность рекомендуется проводить по первой гипотезе наибольших растягивающих напряжений, т.е. $\sigma_{экр} = \sigma_1 \leq [\sigma]$, при условии $\sigma_1 > 0$, или по второй гипотезе — наибольших положительных удлинений:

$$\sigma_{экр} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]. \quad (3.46)$$

В ответственных случаях сопротивление конструкций хрупкому разрушению оценивается методами механики разрушения.

В настоящее время распространён расчёт на прочность по коэффициентам запаса прочности по напряжениям n_σ , по предельным нагрузкам n_Q или по долговечности n_L .

Расчёт по коэффициентам запаса прочности производится в соответствии с неравенствами:

$$\begin{aligned} n_\sigma &= \frac{\sigma_{lim}}{\sigma_{экв}} \geq [n]; \\ n_Q &= \frac{Q_{lim}}{Q_{раб}} \geq [n_Q]; \\ n_L &= \frac{L_{lim}}{L_{раб}} \geq [n_L]; \end{aligned} \tag{3.47}$$

где σ_{lim} — предельное напряжение, $\sigma_{экв}$ — эквивалентное рабочее напряжение, Q_{lim} — предельная характерная нагрузка, при которой происходит потеря работоспособности конструкций, $Q_{раб}$ — рабочая эксплуатационная нагрузка, L_{lim} — предельная наработка детали в эксплуатации, по достижении которой наступает потеря её работоспособности, $L_{раб}$ — рабочая или нормативная наработка, принятая в качестве допустимой в эксплуатации.

Нормативные коэффициенты запаса прочности или долговечности $[n_\sigma]$, $[n_Q]$, $[n_L]$ устанавливаются на основе опыта расчётов и проектирования машин и конструкций и сопоставления их значения с результатами наблюдений за поведением машин и конструкций в эксплуатации [5, 7]. Эти значения зависят от ответственности конструкции, уровня технологии изготовления, однородности свойств материала, вида нагрузок, характера и степени опасности разрушения, точности определения нагрузок и характеристик прочности и других факторов.

Особую актуальность в настоящее время приобретают вероятностные методы расчёта на прочность, позволяющие учесть случайные вариации характеристик прочности и нагрузок и найти вероятность безотказной работы, как основной показатель надёжности [5, 6].

Пусть рабочее напряжение в детали σ_p является случайной величиной, распределённой по нормальному закону со средним значением $\bar{\sigma}$ и среднеквадратичным отклонением S_σ .

Предельное напряжение σ_{lim} (это может быть σ_T , σ_B , σ_{1D} и т.д.) также можно принять распределённым по нормальному закону со средним значением $\bar{\sigma}_{lim}$ и среднеквадратичным отклонением $S_{\sigma_{lim}}$. Будем полагать, что разрушение наступает тогда, когда превысит, иначе говоря, когда будет выполнено условие $\sigma > \sigma_{lim}$, или

Примем, что случайные величины σ_p и σ_{lim} независимы. В этом случае математическое ожидание $\bar{M}$ и дисперсия S_M^2 случайной величины M определяются выражениями:

$\bar{M} = \bar{\sigma}_{lim} - \bar{\sigma}$, $S_M^2 = S_{\sigma_{lim}}^2 + S_\sigma^2$, причём M также распределена по нормальному закону и может быть представлена в виде [6]

$$M = \bar{M} + u_p S_M, \quad (3.48)$$

где u_p — квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности P .

Вероятность разрушения детали соответствует квантили u_p в уравнении (3.48)

$$u_p = -\frac{\bar{M}}{S_M} = -\frac{\bar{\sigma}_{lim} - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_{\sigma_{lim}}^2 + S_\sigma^2}}. \quad (3.49)$$

$$\text{Введя обозначения } n = \frac{\bar{\sigma}_{lim}}{\bar{\sigma}}, \quad v_{\sigma_{lim}} = \frac{S_{\sigma_{lim}}}{\sigma_{lim}}, \quad v_\sigma = \frac{S_\sigma}{\sigma},$$

можно упростить выражение

$$u_p = - \frac{n-1}{\sqrt{v_{\sigma lim}^2 n^2 + v_{\sigma}^2}}. \quad (3.50)$$

Здесь $v_{\sigma lim}$, v_{σ} — коэффициенты вариации предельных и рабочих напряжений соответственно, n — отношение средних значений предельного и рабочего напряжений.

Формула (3.50) позволяет вычислить квантиль нормального распределения u_p , соответствующую вероятность разрушения P . Таким образом, зная величины n , $v_{\sigma lim}^2$ и v_{σ} можно по (3.50.) вычислить u_p и по соответствующей таблице найти вероятность разрушения $P = \Phi(u_p)$.

Выбор *статистических запасов прочности* различных сложных конструкций основан на использовании параметрической модели «*прочность — нагрузка*».

В основу расчётов надёжности с использованием этой модели заложено то, что каждый элемент конструкции обладает определённой прочностью по отношению к действующим на него нагрузкам. При этом под *нагрузкой* понимают любые факторы, влияющие на эффективность функционирования изделия, такие как механические воздействия, температура, вибрация, колебания напряжения питания и др., а *прочность* характеризует способность изделия сохранять свои свойства при воздействии нагрузок.

Исходными данными при расчётах безотказности являются:

$f_s(\bar{S})$ и $f_s(\bar{N})$ — плотности вероятности распределения соответственно прочности и нагрузки; $\bar{S}$ и $\bar{N}$ — векторы параметров, характеризующих прочность и, соответственно, нагрузку.

Безотказная работа изделия определяется условием $\bar{S} > \bar{N}$ или $\bar{S} - \bar{N} > 0$, а общее выражение вероятности безотказной работы имеет вид

$$R = F\{\bar{S} > \bar{N}\} = F\{\bar{S} - \bar{N} > 0\} = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\bar{S}}(\bar{N}) \left[\int_{\bar{N}}^{\infty} f_{\bar{S}}(\bar{S}) d\bar{S} \right] d\bar{N}$$

В одномерном случае имеем выражение

$$R = F\{S > N\} = F\{S - N > 0\} = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f_S(N) \left[\int_N^{\infty} f_S(S) dS \right] dN \quad (3.51)$$

В таблице 5 приведены расчётные формулы вероятности безотказной работы для различных законов распределения прочности и нагрузки [15].

На рисунке 31 приведена блок-схема процедуры расчёта безотказности данным методом.

Как следует из приведённых расчётных соотношений и рисунка 31, метод расчёта безотказности с использованием модели «прочность — нагрузка» базируется на большом объёме статистических данных.

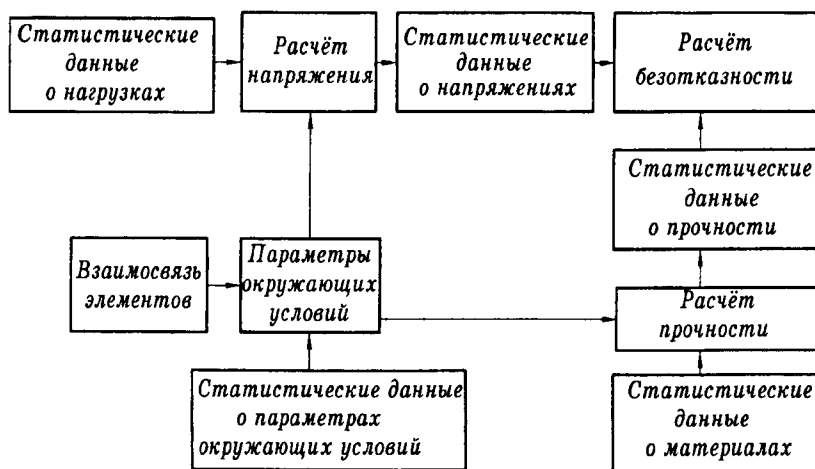


Рис. 31 Блок-схема взаимосвязей параметров, определяющих прочность изделия

Таблица 5

**Расчётные формулы вероятности распределения
безотказной работы для различных законов распределения
прочности и нагрузки**

Закон распределения прочности	Закон распределения нагрузки	Выражение вероятности безотказной работы
Нормальное распределение $f_s(S) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times$ $\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{S - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right\}$	Нормальное распределение $f_s(N) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times$ $\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_N}{\sigma_N} \right)^2 \right\}$	$R = 1 -$ $- \Phi \left(-\frac{\mu_S + \mu_N}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_N^2}} \right)$ где Φ — интегральная функция стандартного нормального распреде- ления
Экспоненциальное распределение $f_N(S) = \lambda_S e^{-\lambda_N S}$	Экспоненциальное распределение $f_S(N) = \lambda_N e^{-\lambda_S N}$	$R = \frac{\lambda_N}{\lambda_S + \lambda_N}$
Нормальное распределение $f_N(S) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times$ $\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{s - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right\}$	Экспоненциальное распределение $f_S(N) = \lambda_N e^{-\lambda_S N}$	$R = 1 - \Phi \left(-\frac{\mu_S}{\sigma_S} \right) -$ $- \exp \left[-\frac{1}{2} (2\mu_S \lambda_N - \lambda_N^2 \sigma_S^2) \right] \times$ $\times \left[1 - \Phi \left(\frac{\mu_S - \lambda_N^2 \sigma_S^2}{\sigma_S} \right) \right]$
Экспоненциальное распределение $f_s(S) = \lambda_S e^{-\lambda_s S}$	Нормальное распределение $f_S(S) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \times$ $\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{S - \mu_s}{\sigma_s} \right)^2 \right\}$	$R = \Phi \left(-\frac{\mu_N}{\sigma_N} \right) +$ $+ \exp \left[-\frac{1}{2} (2\mu_N \lambda_S - \lambda_S^2 \sigma_N^2) \right] \times$ $\times \left[1 - \Phi \left(\frac{\mu_N - \lambda_S^2 \sigma_N^2}{\sigma_N} \right) \right]$

В практических приложениях чаще задают средние значения прочности, нагрузки и их дисперсии. В этом случае в качестве нижней границы безотказности рекомендуется в [15] выражение

$$R \geq 1 - \bar{S} / 2\bar{N} . \quad (3.52)$$

Пример. Рассчитать вал, на который действует скручивающая нагрузка T (рис. 32).

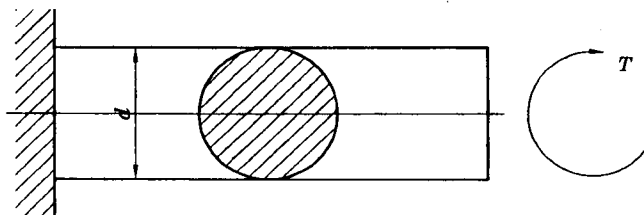


Рис. 32 Схема нагружения вала

Заданное значение безотказности $R_3 = 0,999$. Крутящий момент характеризуется параметрами $\bar{T} = 11300 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\sigma_T = 1130 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Допустимое срезающее напряжение ограничивается значениями $\bar{S} = 345 \text{ МПа}$. Принимаем изменчивость радиуса вала $\sigma_T = (\alpha / 3)\bar{r}$.

Решение. Напряжение среза τ и крутящий момент T определяются по формулам

$$\tau = \frac{1}{2} G \theta d, \quad T = G \theta I_p \quad (3.52)$$

где G — модуль упругости; θ — угол закручивания на единицу длины; d — диаметр вала, I_p — полярный момент инерции вала.

Для круглого сечения:

$$I_p = \pi d^4 / 32; \quad G \theta = 2T / I_p = 32T / (\pi d^4); \quad \tau = 2T / (\pi r^3).$$

Применяя приближённые формулы расчёта, находим:

$$\bar{\tau} = 2\bar{T} / (\pi\bar{r}^3) = 2 \cdot 11300 / (\pi\bar{r}^3);$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{4\sigma_T^2}{\pi^2\bar{r}^6} + \frac{36\bar{T}^2\sigma_r^2}{\pi^2\bar{r}^8}} = \frac{2 \cdot 1130}{\pi\bar{r}^3} \sqrt{1 + (10\alpha)^2}.$$

Для $R_s = 0,999$ из таблиц стандартного нормального распределения имеем $z = 3,09$.

Таким образом,

$$3,09 = \frac{3,45 \cdot 10^6 - 2 \cdot 1130\pi\bar{r}^3}{\sqrt{(3,45 \cdot 10^6) + (2 \cdot 1130 / \pi\bar{r}^3)^2 (1 + 100\alpha^2)}}.$$

Выбирая $\alpha = 0,03$, получим $\bar{r}^6 - 46,1056\bar{r}^3 + 0,8666 = 0$ и окончательно для корней уравнения $\bar{r}_1 = 32,131$ и $\bar{r}_2 = 23,475$ имеем соответственно $R = 0,999$ и $R = 0,001$.

Влияние допуска α и прочности материала на надёжность R очевидно из таблиц 6, a и 6, b . В таблице 6, $в$ показано влияние радиуса вала на надёжность R .

Таблица 6

Влияние допуска, прочности материала, радиуса вала на надёжность

a)

$\alpha, \%$	3	4	5	10
Z	3,099	3,072	3,035	2,772
R	0,99903	0,9969	0,9988	0,9974

б)

$\sigma_s, \text{МПа}$	34,475	41,37	55,166	68,95
z	3,099	2,712	2,145	1,763
R	0,99903	0,99664	0,98422	0,96080

в)

$\bar{r}, \text{мм}$	30,48	32,132	35,56	40,64
z	2,086	3,09	4,824	6,555
R	0,98169	0,999	0,9999	0,99999

3.8 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Износостойкость. Практически долговечность любой машины в наибольшей степени определяется изнашиваемостью деталей и узлов. Постепенно развивающийся износ ведёт к общему ухудшению показателей машины, снижению точности выполняемых ею операций, падению КПД, увеличению энергопотребления и снижению полезной отдачи. С течением времени износ может вступить в катастрофическую стадию. Прогрессирующее повреждение вызывает поломки и аварии (разрушение подшипников качения, выкрашивание зубьев зубчатых колёс и т.п.).

Основной вид износа в машинах — механический, который разделяется на износ абразивный, износ при трении скольжения, износ при трении качения и контактный. Некоторые детали подвержены износу химическому (коррозионному), тепловому, кавитационно-эрозионному. Разнообразие видов износа и различие их физико-механической природы требуют дифференцированного изучения и специальных методов предотвращения изнашиваемости. Подробнее эти вопросы рассматриваются в учебном курсе «Триботехника».

Основными способами повышения износостойкости при механическом износе являются увеличение твёрдости трущихся поверхностей, подбор материалов трущихся пар, уменьшение давления на поверхностях трения, повышение качества поверхностей и правильная смазка. Современная технология располагает эффективными средствами повышения поверхностной твёрдости: цементация и обработка ТВЧ (HV 500—600), азотирование (HV 800—1200), бериллизация (HV 1000—1200), диффузионное хромирование (HV 1200—1400), плазменное наплавление твёрдыми сплавами (HV 1400—1600), борирование (HV 1500—1800), борицианирование (HV 1800—2000) и др.

Другое направление заключается в улучшении антифрикционных свойств поверхностей осаждением фосфатных плё-

нок (фосфатирование), насыщением поверхностного слоя серой (сульфидирование), графитом (графитирование), дисульфидом молибдена и др. При умеренной твёрдости такие поверхности обладают малым коэффициентом трения, высокой устойчивостью против задиrow, заедания и схватывания. Эти способы (особенно сульфидирование и обработка дисульфидом молибдена) увеличивают износостойкость стальных деталей в 10–20 раз. Применяют и сочетание обоих методов (например, сульфоцианирование).

Важное значение имеет правильное сочетание твёрдости парных поверхностей трения. При движении с малыми скоростями под высокими нагрузками целесообразно максимальное повышение твёрдости обеих поверхностей, а при движении с большими скоростями в присутствии смазки — сочетание твёрдой поверхности с мягкой, обладающей повышенными антифрикционными свойствами.

Эффективным способом увеличения износостойкости является уменьшение давления в трущихся соединениях. Иногда этого можно достичь уменьшением нагрузок (рациональная раздача сил) или снижением степени цикличности и ударности нагрузок. Наиболее простой способ заключается в увеличении площади поверхности трения, нередко достигаемом без существенного увеличения габаритных размеров.

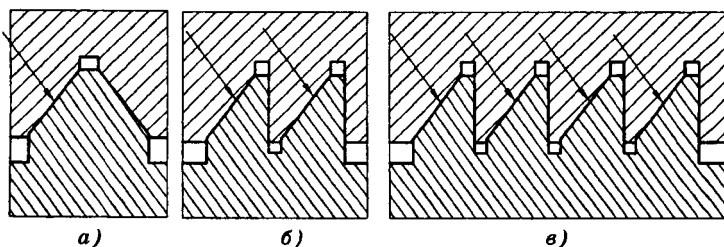


Рис. 33 Уменьшение давления в направляющих одностороннего действия

В качестве примера приведём направляющую металло-режущего станка, испытывающую нагрузку односторонне-

го действия (рис. 33, а). Изменение профиля направляющей (рис. 33, б) позволяет примерно в тех же габаритах увеличить опорную поверхность и снизить давление вдвое с соответствующим повышением долговечности. Ещё большей долговечностью обладают гребенчатые направляющие (рис. 33, в). В этом случае давление уменьшается в 4 раза при увеличении габаритов примерно только в 2 раза по сравнению с исходной конструкцией.

Во всех случаях, когда допускает конструкция, точечный контакт следует заменять линейным, линейный — поверхностным, трение скольжения — трением качения.

Невыгодны зубчатые передачи с точечным контактом: передачи с перекрещивающимися осями, конические с криволинейными зубьями, косозубые колёса с большим углом наклона зубьев, а также крутовинтовые передачи. Последние невыгодны ещё и тем, что пятно контакта у них перемещается с большой скоростью вдоль зуба при наличии трения скольжения, тогда как в передачах с эвольвентным зубом преобладает трение качения с малой скоростью скольжения.

Особое направление заключается в компенсации износа, осуществляемой периодически или автоматически. К числу узлов с периодической компенсацией принадлежат подшипники скольжения с осевым или радиальным регулированием зазора (с коническими несущими или посадочными поверхностями, с периодически подтягиваемыми вкладышами). Другие примеры — осевая подтяжка подшипников качения (радиально-упорных) и регулирование зазора в прямолинейных направляющих с помощью переставных клиньев и планок.

Более совершенны системы с автоматической компенсацией износа (самопритирающиеся конические пробковые краны, торцовые и манжетные уплотнения, системы гидравлической компенсации зазоров в рычажных механизмах и т.д.).

Решающее значение имеет правильная смазка узлов трения. Везде, где это возможно, следует обеспечивать жидко-

стную смазку и устранять полужидкостную и граничную. Все трущиеся части должны быть заключены в закрытые корпуса и надёжно защищены от пыли, грязи и атмосферной влаги. Наилучшим решением являются полностью герметизированные системы с непрерывной подачей масла под давлением ко всем подвижным соединениям.

Эффективность смазки повышают введением присадок, улучшающих её смазочные качества (коллоидальный графит, сера, дисульфид молибдена), увеличивающих маслянистость (олеиновая, пальмитиновая и другие органические кислоты), предупреждающих окисление (органические и металлоорганические соединения S, P и N₂), предотвращающих задиры (кремнийорганические соединения).

В условиях, когда применение жидких масел невозможно (работа при высоких или низких температурах, при радиации, в химически агрессивных средах, глубоком вакууме) или неэффективно (при колебательных движениях малой амплитуды, при ударных и высокочастотных нагрузках), применяют сухоплёночные смазки на основе сульфидов, селенидов и теллуридов Mo, W, V и др. со связками металлов Fe, Ni, Ag, Au. Коэффициент трения соединений с сухоплёночными смазками = $0,1 \div 0,25$.

Другой способ — смазка сухими порошками, состоящими из микросфер ($d = 1 \div 3$ мкм), изготовленных из твердых (HV 800–900) материалов (вольфрамовые сплавы, науглероженное карбонильное железо). В таких подшипниках происходит отчасти перекаат одной несущей поверхности относительно другой по микросферам, главным же образом — скольжение по очень подвижному и текучему слою порошка (псевдожидкостное трение). Несущие поверхности изготавливают из материалов такой же твёрдости, что и микросферы (азотированные стали, металло- и минералокерамика, ситаллы).

Идеальным с точки зрения износостойкости является полное устранение металлического контакта между рабочими поверхностями. Примерами безызносных узлов явля-

ются электромагнитные опоры с «витающими» валами, электромагнитные муфты и насосы (передача крутящего момента и осевого движения электромагнитными силами), муфты жидкостного трения (передача крутящего момента силами вязкого сдвига силиконовой жидкости), гидравлические трансформаторы (передача крутящего момента гидродинамическими силами потока жидкости).

Известное приближение к принципу безызносной работы представляют подшипники скольжения с *гидродинамической смазкой* (см. учебный курс «Триботехника» Использование эффекта избирательного переноса).

При непрерывной подаче масла и наличии клиновидности масляного зазора, обуславливающей нагнетание масла в нагруженную область, в таких подшипниках на устойчивых режимах работы металлические поверхности полностью разделяются масляным слоем, что обеспечивает теоретически безызносную работу узла. Их долговечность не зависит (как у подшипников качения) ни от нагрузки, ни от скорости вращения (числа циклов нагружения). Уязвимым местом подшипников скольжения является нарушение жидкостной смазки на нестационарных режимах, особенно в периоды пуска и остановки, когда из-за снижения частоты вращения нагнетание масла прекращается и между цапфой и подшипником возникает металлический контакт.

В последнее время получили применение гидростатические подшипники с подачей в зазор масла под давлением от автономного насоса. В таких подшипниках трущиеся поверхности разделяются масляным слоем ещё до пуска машины; изменение частоты вращения не влияет на работоспособность подшипника. В гидростатических подшипниках возможно увеличение толщины масляного слоя до 100–120 мкм вместо обычных в гидродинамических подшипниках значений 10–20 мкм, что снижает (примерно на один порядок) коэффициент трения подшипника и общие затраты мощности на трение (с учётом мощности привода насоса).

Схема гидростатической опоры (подпятник) приведена на рисунке 34, *а*. Масло из насоса через дроссель 1 поступает в карман 2 с запорной кольцевой кромкой 3. Давление в кармане зависит от соотношения между сечением дросселя и переменным сечением между запорной кромкой и пятой. С увеличением нагрузки это сечение уменьшается, и давление в кармане возрастает, становясь в пределе равным давлению, создаваемому насосом. При ударных нагрузках давление в кармане, благодаря «закупорке» дросселя в результате повышения его гидравлического сопротивления, может значительно превзойти давление, создаваемое насосом. В цилиндрических опорах, нагруженных силами переменного направления, применяют систему нескольких радиально расположенных карманов (рис. 34, *б*). При указанном направлении нагрузки несущим является нижний карман. Давление в верхнем кармане отсутствует вследствие истечения масла через увеличенный зазор на верхней дуге подшипника. Боковые карманы, давление в которых взаимно уравновешено, нагрузку не воспринимают. Масло, вытекающее через верхний и боковые карманы, выполняет обычную функцию охлаждения подшипника.

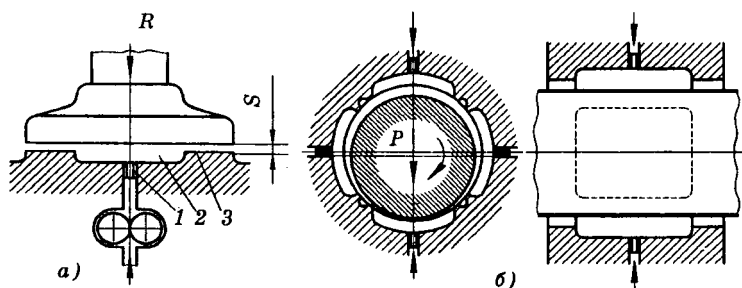


Рис. 34 Гидростатические подшипники:
а — упорный, *б* — радиальный

При перемене направления нагрузки на 180° верхний карман становится несущим, нижний — питающим. Аналогичное явление происходит при перемене направления

нагрузки на 90° . Таким образом, подшипник, реагируя на перемещения вала, автоматически настраивается на восприятие нагрузки каждый раз в направлении вектора силы.

В связи с появлением гидростатических подшипников происходит переоценка сравнительных достоинств опор скольжения и опор качения, которым до сих пор отдавали определённое предпочтение. Опоры скольжения с правильно организованной смазкой принципиально выгоднее, так как они позволяют полностью исключить металлический контакт и осуществить безызносную работу, тогда как в опорах качения металлический контакт и износ неизбежны. Применение гидростатических подшипников, однако, ограничивается усложнением системы смазки, в частности, необходимостью привода масляных насосов (на периоды пуска и остановки) от постороннего источника энергии.

Аэростатические (газостатические) подшипники используют, когда жидкие смазочные материалы неприменимы: при высоких частотах вращения (> 50 тыс. об/мин.), высоких ($> 250^\circ\text{C}$) и низких ($< -50^\circ\text{C}$) температурах, при работе в средах, вызывающих разложение масел, в установках, подвергающихся радиации.

Применение воздушной смазки также целесообразно, когда трущиеся поверхности подвергаются загрязнению (открытые цилиндрические опоры и направляющие прямоугельного движения).

Воздушную и газовую смазку применяют в радиальных и упорных подшипниках быстроходных шлифовальных шпинделей, быстроходного сверлильного оборудования, роторов, центрифуг, турбомашин, криогенных агрегатов, в опорах прецизионных поворотных столов, металлообрабатывающих станков.

Несущая способность аэростатических опор, в частности сопротивляемость ударным нагрузкам, значительно ниже, чем гидростатических. Однако они обладают гораздо меньшим коэффициентом трения и вследствие малых зазоров (2–10 мкм) обеспечивают высокую точность центриро-

вания. Несущая способность аэростатических опор (в противоположность гидростатическим) возрастает с повышением температуры вследствие увеличения вязкости воздуха с ростом температуры.

Одной из наиболее частых причин преждевременного выхода машины из строя является коррозия. В конструкции машин, особенно работающих на открытом воздухе, в условиях повышенной влажности или в химически активных средах, следует предусматривать эффективные средства защиты, применяя гальванические покрытия (хромирование, никелирование, омеднение), осаждение химических плёнок (фосфатирование, оксидирование), нанесение полимерных плёнок (капронизация, полителинизация).

Наилучшим решением является применение коррозионностойких материалов (коррозионностойких сталей, титановых сплавов). Малонагруженные детали, соприкасающиеся с химически активными агентами, целесообразно изготавливать из химически стойких пластиков (полиолефины, фторопласты).

Применяя все описанные выше технологические и конструктивные мероприятия, можно у машин общего назначения повысить срок службы большинства деталей практически до любых значений, требуемых долговечностью машины в целом.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Перечислите основные критерии надёжности.
2. Как определяется вероятность безотказной работы, плотность распределения отказов, интенсивность отказов?
3. Перечислите основные статистические распределения, используемые в теории надёжности.
4. Запишите основные уравнения теории надёжности для экспоненциального закона.
5. Как определяются показатели надёжности для систем с последовательным и параллельным соединением элементов?

6. Поясните уровень повышения надёжности системы с использованием метода резервирования.

7. Как определяется надёжность при совместном действии внезапных и износowych отказов?

8. Чем определяется надёжность восстанавливаемых изделий?

9. Перечислите основные методы расчёта прочности деталей машин.

10. Как рассчитываются статистические запасы прочности с использованием параметрической модели «прочность — нагрузка»?

11. Перечислите основные конструктивные методы повышения надёжности узлов трения машин.

12. Как оценить экономическую эффективность восстановления работоспособности технических устройств (машин)?

ГЛАВА 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН

4.1 ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ МАШИНЫ

Экономический фактор играет первостепенную роль в конструировании. Частности конструкции не должны заслонять основной цели конструирования — *увеличения экономического эффекта машин.*

Снижение стоимости машиностроительной продукции представляет комплексную задачу: производственную и конструкторскую. Многие конструкторы считают, что экономически конструировать — значит уменьшать стоимость изготовления машины, избегать сложных и дорогих решений, применять наиболее дешёвые материалы и наиболее простые способы обработки. Это только небольшая часть задачи. Главное значение имеет то, что экономический эффект определяется полезной отдачей машины и суммой эксплуатационных расходов за весь период работы машины. Стоимость машины является только одной, не всегда главной, а иногда и очень незначительной составляющей этой суммы.

В области производства и изготовления машин наибольший эффект имеет место при больших масштабах производства и стабильной продукции. Здесь на первый план выступает роль связи «конструктор — технолог». Конструктор должен обеспечить высокий потенциал развития, заложив в конструкцию предпосылки изготовления одной модели в течение длительного периода времени при наибольшем возможном масштабе выпуска, т.е. создать конструкцию, обладающую широкой применяемостью и ресурсами совершенствования. Технолог — обеспечить качество изготовления современными методами обеспечения качества.

Экономически направленное конструирование должно учитывать весь комплекс факторов, определяющих эконо-

мичность машины, и правильно оценивать относительное значение этих факторов. Это правило часто игнорируют. Стремясь к удешевлению продукции, конструктор нередко добивается экономии в одном направлении и не замечает других, гораздо более эффективных путей повышения экономичности. Большое значение имеет уменьшение числа типоразмеров машины рациональным выбором типажа и её параметров, что позволяет повысить серийность производства с выигрышем в стоимости изготовления.

Главными факторами, определяющими экономичность машины, являются полезная отдача машины, долговечность, расходы на оплату труда операторов, потребление энергии и стоимость материалов и ремонтов.

Полезная отдача. Рентабельность

Полезная отдача выражается стоимостью продукции или полезной работы, выполняемой машиной в единицу времени. Полезная отдача зависит от производительности машин, т.е. от числа операций (или единиц работы), выполняемых в единицу времени, стоимости операций (единиц работы). Увеличение отдачи является комплексной задачей, решение которой во многом зависит от правильности эксплуатации. Для автомобилей, например, эксплуатационные средства повышения отдачи заключаются в сокращении холостых пробегов, увеличении технической скорости езды, повышении грузоиспользования (применение прицепов) и т.д.

Производительность машин-орудий повышают интенсификацией технологических операций, применением приспособлений и специальной оснастки. В основном эту задачу необходимо решать конструктивными мероприятиями. Машине должна быть придана наибольшая возможная производительность, согласованная с реальными требованиями производства и перспективами его развития. Рабочие органы машины следует рассчитывать на максимальный объём операций с соответствующим выбором мощности.

Главными способами повышения производительности машин являются:

- увеличение числа одновременно осуществляемых над изделием операций, сокращение длительности цикла;
- увеличение числа одновременно обрабатываемых изделий;
- автоматизация технологического процесса.

Первый способ получил наиболее полное выражение в конструкции агрегатных металлообрабатывающих станков, позволяющих обрабатывать детали одновременно по нескольким или всем поверхностям. Другим примером могут служить многорезцовые токарные автоматы.

Представителями второго способа являются роторные машины, на которых одновременно обрабатывают большое число деталей. Другой пример — групповая обработка одновременно нескольких деталей в многоместных приспособлениях.

Роторными называют машины карусельного типа, у которых каждое изделие или объект, подвергаемые определённым операциям или комплексу операций, устанавливаются на карусель. Изделие закрепляется за отдельным операционным органом (блок, патрон, шпиндель) и обрабатываются в процессе вращения карусели за один полный её оборот. Роторные машины обладают высокой производительностью (карусельные наполнители с 40–60 шпинделями дают до 1500 наполнений в 1 мин.). Высокая производительность роторных машин является следствием непрерывности действия и выполнения технологической операции одновременно над несколькими объектами.

Производительность роторной машины

$$Q = i \cdot n,$$

где i — число блоков и инструментов, орудий и т.д.

n — частота вращения ротора (об/мин.), зависящая от продолжительности выполняемой над объектом операции (фазового времени),

$$Q = i \cdot \frac{\alpha}{t_{\phi}}, \text{ где } n = \frac{\alpha}{t_{\phi}}, \quad (4.1)$$

где t_{ϕ} — фазовое время, мин.; α — доля окружности, на которой происходит операция обработки (обычно $\alpha = 0,654 \div 0,75$). Как видно из выражения (4.1), производительность роторной машины можно увеличить путём: 1) уменьшения фазового времени (ускорением выполняемой над объектом операции); 2) увеличением числа операционных блоков.

Возможности первого способа ограничены. Второй способ позволяет увеличить производительность практически сколь угодно. Лимитирующими нередко становятся только операции загрузки и разгрузки изделий. Роторные машины хорошо komponуются в автоматические линии, высокопроизводительные, компактные и экономичные (благодаря сокращению энергозатрат на транспортирование деталей от одной машины к другой).

Рентабельность (R_q). Выражается отношением полезной отдачи машины O_T за определённый период к сумме расходов P за тот же период:

$$R_q = \frac{O_T}{P}. \quad (4.2)$$

Величина R_q должна быть больше 1, иначе машина будет работать убыточно, и смысл её существования утрачивается.

Сумма расходов в общем случае складывается из стоимости: $\mathcal{E}_H$ — расходуемой энергии, M_T — материалов и заготовок, I_H — инструмента, T_P — оплаты труда операторов, O_B — технического обслуживания, P_M — ремонта, H_K — накладных цеховых и заводских расходов, A_M — амортизационных расходов:

$$P = \mathcal{E}_H + M_T + I_H + T_P + O_B + P_M + H_K + A_M. \quad (4.3)$$

Экономический эффект

Годовой экономический эффект от работы машины (годовой доход):

$$Q = O_T - P = O_T \left(1 - \frac{P}{O_T} \right) = O_T \left(1 - \frac{1}{R_q} \right), \quad (4.4)$$

где O_T — годовая отдача, р./год; P — сумма расходов, р./год.

Суммарный экономический эффект ΣQ за весь период службы машины (общий доход) равен разности суммарной отдачи ΣO_T , и суммы расходов ΣP за период службы: $\Sigma Q = \Sigma O_T - \Sigma P$ или согласно формуле (4.3)

$$\Sigma Q = \Sigma O_T \Sigma (\varepsilon_H + M_T + I_H + T_P + O_B + P_M + H_K + A_M)$$

Отдача машины и эксплуатационные расходы, за исключением ΣA_M и ΣP_M ; пропорциональны продолжительности фактической работы h за период эксплуатации. Амортизационные расходы за период эксплуатации принимают равными стоимости C машины. Ремонтные расходы не находятся в прямой зависимости от h ; их размер и периодичность определяется условиями эксплуатации и надёжностью машины.

Выделяя факторы ΣP_M и $A_M = C$ из суммы расходов получим

$$\Sigma Q = \Sigma O_T \Sigma (\varepsilon_H + M_T + I_H + T_P + O_B + P_M + H_K + A_M)$$

Если машина работает до исчерпания механического ресурса ($h = D$), то

$$\Sigma Q = D [O_T - (\varepsilon_H + M_T + I_H + T_P + O_B + H_K)] - \Sigma P_M - C. \quad (4.5)$$

Повышение отдачи может выражаться или в увеличении числа единиц продукции, то есть производительности, или в увеличении стоимости каждой единицы (повышение качества продукции, увеличение объёма операции, выполняемых над заготовкой).

В первом случае расход материалов и инструмента пропорционален отдаче: $M_T + I_n = \alpha O_T$, где α — доля стоимости материала и инструмента в стоимости продукции, колеблющаяся в зависимости от профиля продукции в пределах 0,1–0,5. Накладные расходы принято выражать в долях трудовых затрат: $H_K = \beta T_p$, где β — фактор пропорциональности, колеблющийся в зависимости от типа и формы организации производства в пределах 0,5–3,0.

Введя эти зависимости в уравнение (4.5) величину суммарного экономического эффекта, получим

$$\sum Q = D[O_T(1 - \alpha) - \mathcal{E}_H - (1 + \beta)T_p - O_B] - \sum P_M - C. \quad (4.6)$$

Коэффициент использования машин $\eta_{исп}$

Представляет собой отношение времени фактической работы машины за определённый период к длительности этого периода.

Пусть H — период эксплуатации машины, h — фактическое время работы машины за этот период. Если машина работает до полного исчерпания своего механического ресурса, то h представляет собой долговечность машины D (общую возможную её наработку за период эксплуатации).

Тогда средний за этот период коэффициент использования

$$\eta_{исп} = \frac{h}{H}, \quad \eta_{исп} = \frac{D}{H}. \quad (4.7)$$

Величина $\eta_{исп}$ для машин, работающих по календарному режиму, зависит главным образом от:

- 1) числа рабочих смен;
- 2) холостого времени (простой из-за неисправности машины, недогрузки из-за нарушения производственного ритма) и т.д.

При работе в одну, две и три смены средние значения коэффициента использования соответственно $\eta_{исп} = 0,2; 0,4; 0,6$, при круглосуточной непрерывной работе $\eta_{исп} = 0,95 \div 4$.

У машин периодического действия, например машин сезонного применения, коэффициент использования снижается до $0,05 \div 0,10$.

Коэффициенты эксплуатационных расходов и стоимости машины

Коэффициентом эксплуатационных расходов K_p называют отношение суммы расходов за весь период работы машины к её стоимости:

$$K_p = \frac{\Sigma P}{C} = \frac{D(\Theta_H + M_T + И_H + T_P + O_B + H_K) + \Sigma P_M + C}{C}.$$

Тогда уравнение (4.5) можно представить в следующем виде:

$$\Sigma Q = DO_T - K_p C. \quad (4.8)$$

Коэффициентом стоимости машины K_c называют процентное отношение стоимости машины к сумме расходов.

$$K_c = \frac{C}{\Sigma P} 100\% = \frac{1}{K_p} 100\%.$$

Перечисленные критерии в комплексе позволяют оценить экономические показатели конструкции машины в течение всего срока эксплуатации.

Как следует из формулы, коэффициент эксплуатационных расходов возрастает с увеличением долговечности и при больших значениях D может достигать 50—100. Соответственно снижается доля стоимости машины в общей сумме расходов, то есть коэффициент K_c .

Срок окупаемости ($H_{ок}$)

Срок окупаемости определяется как период службы, при котором суммарный экономический эффект равен стоимости машины, т.е.

$$\Sigma Q = C = H_{OK}\eta_{исп}(O_T - P) - A_M, \quad (4.9)$$

где P — годовые эксплуатационные расходы.

Затраты на ремонт в первые годы эксплуатации как всегда малы и ими пренебрегают.

$$P = \mathcal{E}_H + M_T + И_H + T_P + O_B + H_K.$$

Расход на амортизацию за срок окупаемости определяется

$$A_M = \frac{CH_{OK}}{H} = \frac{CH_{OK}\eta_{исп}}{D},$$

где H — период службы машины,

D — долговечность.

После подстановки значения A_M в уравнение (4.9) получаем

$$H_{OK} = \frac{C}{\eta_{исп} \left(O_T - P - \frac{C}{D} \right)}. \quad (4.10)$$

Пример 1.

Пусть $C = 2000$ р.; $D = 5$ лет;

$\eta_{исп} = 0,4$ (работа в две смены);

$O_T = 15000$ р./год;

$\mathcal{E}_H = 600$ р./год, $M_T + И_H = 4000$;

$T_P + O_B = 3200$; $H_K = 3000$ р./год.

Сумма расходов

$P = 600 + 4000 + 3000 + 3200 = 10600$ р./год. Согласно формуле (4.10) срок окупаемости

$$H_{OK} = \frac{2000}{0,4(15000 - 11100 - 600)} = 1,4 \text{ года.}$$

При работе в одну смену $\eta_{исп} = 0,2$ и $H_{OK} = 2,8$ года.

4.2 ВЛИЯНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ И ЧИСЛЕННОСТЬ МАШИННОГО ПАРКА

Влияние долговечности на объём продукции

Суммарный объём продукции ΣS , отдаваемый машиной за весь срок её службы H , равен произведению годовой отдачи O_T на фактическую продолжительность её работы:

$$\Sigma Q = O_T \cdot H \cdot \eta_{исп} = \Sigma S = O_T \cdot D. \quad (4.11)$$

Годовой объём продукции группы действующих машин равен произведению годовой отдачи каждой машины на коэффициент использования $h_{исп}$ и число N одновременно находящихся в эксплуатации машин:

$$\Sigma Q_{год} = O_T \cdot \eta_{исп} \cdot N. \quad (4.11^*)$$

Число действующих в каждый данный промежуток времени машин

$$N = nH,$$

где n — численность годового выпуска машин.

С учетом формул 4.11–4.11* суммарный объём годовой продукции

$$\Sigma S_{год} = O_T \cdot n \cdot H \cdot \eta_{исп} = O_T \cdot n \cdot D. \quad (4.12)$$

Следовательно, суммарный объём продукции, отдаваемый машиной за срок её службы, и годовой объём продукции группы одновременно действующих машин (4.11) пропорциональны произведению годовой отдачи на долговечность машины. Увеличение долговечности, например в 2 раза, вызывает увеличение объёма годовой продукции вдвое. При одновременном увеличении в 2 раза отдачи и долговечности объём продукции возрастает в 4 раза. Если объём годовой продукции задан, то повышение долговечности и отдачи позволяет сократить пропорционально произведению $n \cdot h$ годовой выпуск машин с существенным выигрышем.

шем в суммарной стоимости выпуска машин и оплаты труда при общем повышении экономического эффекта.

Определим экономический эффект при сокращении выпуска машин за счёт увеличения отдачи и долговечности. Сравним две группы машин, первая из которых состоит из 1000 машин стоимостью каждая 2000 р. с отдачей $O_T = 20\,000$ р./год и долговечностью $D = 5$ лет, а вторая группа — из 500 машин стоимостью каждая 4000 р. с отдачей 40000 р./год и долговечностью 10 лет. Годовая отдача обеих групп, очевидно, одинакова:

$$O_T = 1000 \cdot 20000 = 500 \cdot 40000 = 20 \text{ млн. р.}$$

Суммарный экономический эффект машин первой группы за весь период эксплуатации согласно формуле (4.6)

$$\Sigma Q = n \cdot \{ D[O_T(1 - \alpha) - (\mathcal{E}_H + T_P + O_B + H_K)] - \Sigma P_M - C \}.$$

Пользуясь данными предыдущего примера (см. пример 1), $a = 0,25$; $\mathcal{E}_H = 600$ р./год; $T_{pm\,об} = 3200$; $H_K = 3200$ р./год; $P_M = C$), получаем $\Sigma Q_1 = 10^3 [5(2 \cdot 10^4 \cdot 0,75 - 7000) - 4000] = 36 \text{ млн. р.}$

Суммарный экономический эффект машин второй группы за тот же период эксплуатации

$$\Sigma Q_2 = 500 \cdot \{ 5[O_T(1 - \alpha) - (\mathcal{E}_H' + T_P + O_B + H_K)] - \Sigma P_M' - C' \}$$

Положим, что расход энергии у машин второй группы вдвое больше ($\mathcal{E}_H' = 1200$ р./год). Так как машины отрабатывают за 5 лет только половину своего срока службы, то расходы на амортизацию и ремонт равны $C = 0,5C = 0,5 \cdot 4000 = 2000$ р. и $\Sigma P_M' = 0,5C = 0,5 \cdot 4000 = 2000$ р.

Подставляя эти значения в расчётную формулу, получаем

$$\Sigma Q_1 = 500 [5 (30000 - 8600) - 4000] = 53 \text{ млн. р.}$$

Следовательно, экономический эффект машин второй группы за 5 лет эксплуатации в $53/36 \approx 1,5$ раза больше,

чем машин первой группы, несмотря на вдвое большую стоимость машин, ремонта и энергопотребления.

Суммарный экономический эффект машин второй группы за срок службы (10 лет)

$$\Sigma Q_1 = 500[10 (30000 - 8600) - 4000 - 4000] = 106 \text{ млн. р.,}$$

т.е. превышает суммарный экономический эффект машин первой группы в $108/36 = 3$ раза или в денежном выражении на $106 - 36 = 70$ млн р., что вдвое больше всего экономического эффекта машин первой группы.

Влияние долговечности на численность машинного парка

Повышение долговечности является наиболее эффективным и экономичным способом увеличения численности машин, находящихся одновременно в эксплуатации (текущей численности машинного парка). Число машин, действующих в каждое данное время, пропорционально произведению их долговечности D на выпуск n единиц/год за предшествующее время ($D \cdot n$).

Разберём пример, когда годовой выпуск постоянен и равен 100 машин. Пусть долговечность выпускаемых машин — 3 года; машины работают непрерывно, т.е. срок их службы равен долговечности.

На диаграмме (рис. 35, а) представлена картина использования машин по годам. Численность годового выпуска изображена чёрными прямоугольниками. Сумма прямоугольников по горизонтали показывает продолжительность пребывания машин в эксплуатации, равную в рассмотренном случае 3 годам; сумма прямоугольников по вертикали — число групп машин разных годов выпуска, находящихся одновременно в эксплуатации. При постоянстве годового выпуска и долговечности оно для любого года численно равно долговечности ($n = 3$). Следовательно, общая численность действующего машинного парка в каждом году $N = nD = 100 \cdot 3 = 300$.

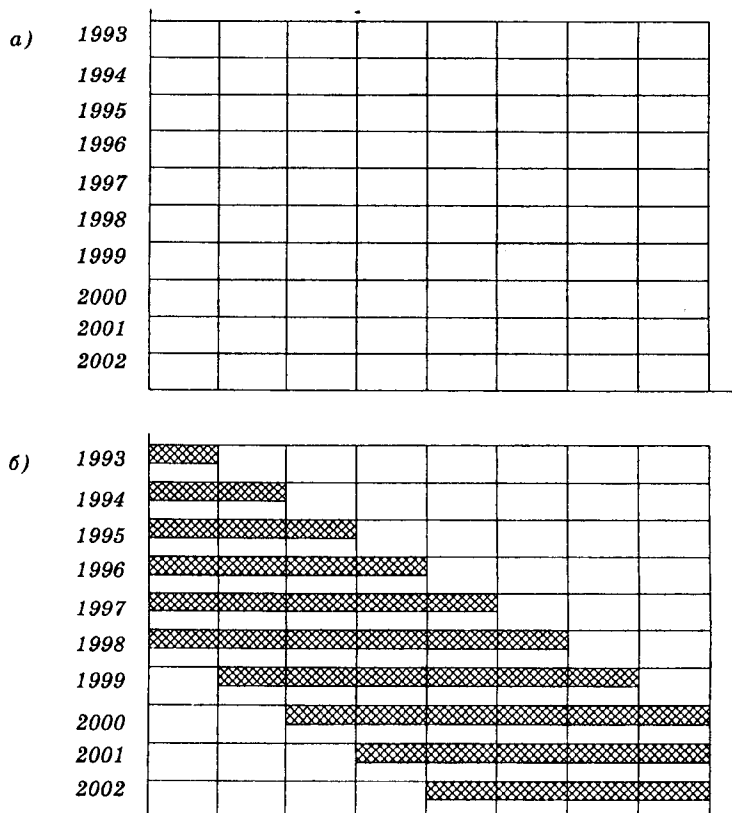


Рис. 35 Эксплуатационные диаграммы использования машин

Предположим теперь, что начиная с 1994 г. завод-изготовитель увеличивает долговечность машин вдвое (заштрихованные прямоугольники). Продолжительность пребывания машин в эксплуатации, выражаемая суммой чёрных и заштрихованных прямоугольников по горизонтальным графам диаграммы, становится равной $D = 6$ лет. Численность машинного парка, начиная с 1995 г., возрастает и в 1997 г. стабилизируется, оставаясь все последующие годы постоянной и равной 600 машинам, т.е. производству новой долговечности на размер годового выпуска: $N' = D'n$.

Таким образом, при том же размере годового выпуска машин с увеличением долговечности вдвое во столько же возрастает численность машинного парка, а следовательно, объём годовой (и суммарной за весь период службы машин) промышленной продукции.

Разберём случай, когда машины используются в течение неполного рабочего времени, т.е. когда период службы машины удлинняется по сравнению с заложенным в неё ресурсом долговечности (рис. 35, б).

Если по-прежнему принять $D = 3$ и $n_{исп} = 0,5$, то согласно формуле (4.7) $H = 3/0,5 = 6$ лет. Сокращение степени использования машин равносильно уменьшению числа одновременно действующих машин. В нашем случае ($n_{исп} = 0,5$) — это сокращение выражается на диаграмме уменьшением вдвое высоты чёрных прямоугольников. Число одновременно работающих в течение года машин одного года выпуска становится равным 50.

Количество групп машин различного года выпуска, находящихся одновременно в эксплуатации, равно сумме прямоугольников по вертикальным графам диаграммы. При исходных допущениях ($n = \text{const}$; $H = \text{const}$) оно для любого года численно равно периоду службы ($H = 6$). Общая численность N годового парка равна произведению срока службы на фактическую численность одновременно работающих машин каждой группы ($n_{факт} = n \eta_{исп}$), т.е. $N = \Pi \eta_{исп}$. Так как $H = D/\eta_{исп}$, то $N = Dn$. В рассматриваемом случае $N = 3 - 100 = 300$. Этот вывод легко проверить простым суммированием численности машин по вертикальным графам диаграммы ($N = 50H = 50 - 6 = 300$).

Таким образом, численность действующего годового парка машин не зависит от коэффициента использования и срока службы и определяется только долговечностью машин и размером их годового выпуска.

Если же продолжительность пребывания машины в эксплуатации лимитирована техническим устареванием, то картина резко изменяется: машина не успевает отработать за-

ложенный в ней ресурс и ее приходится снимать с производства досрочно, теряя при этом продукцию, которую она могла бы выдать при полном использовании её долговечности.

Покажем это на примере (рис. 36). Пусть долговечность машин равна 6 годам. Предположим, что вследствие малого коэффициента сменности, вынужденных простоев и т.п. машины используются в каждый данный момент на 30 %. При периоде службы, соответствующем полному использованию долговечности, т.е. при $H = 6/0,3 = 20$ лет, машина, как очевидно из предыдущего, отдаст продукцию, равную $6 O_T$ (O_T — годовая продукция). При ежегодном выпуске $n = 100$ суммарная отдача машин одного года выпуска составит $600 O_T$, а за 10 лет (1994–2003 гг.) — $6000 O_T$.

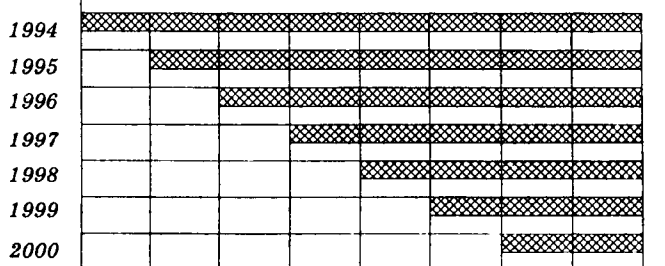


Рис. 36 Эксплуатационные диаграммы использования машин

Допустим, что лимит технической долговечности равен 10 годам. Это значит, что в 2004 г., через 10 лет после начала выпуска, машины подлежат снятию с эксплуатации. До этого времени машины выпуска 1995 г. успевают отдать только 50 % потенциального объёма своей продукции ($0,5 \cdot 600 O_T = 300 O_T$), выпуска 1996 г. — 45 %, выпуска 1997 г. — 40 % и т.д. Суммарная продукция машин всех выпусков (1994–2003 гг.) составит $1650 O_T$, т.е.

$\frac{1650}{6000} 100 \% = 27,5\%$ продукции, которую они могли бы отдать при полной отработке ресурса.

Таким образом, лимит, налагаемый технической долговечностью, резко сокращает суммарную отдачу машин. В рассматриваемом случае выпуск машин, обречённых в близком будущем на техническое устаревание, приведёт к огромным потерям. Рассмотренные случаи относятся к числу простейших. При ежегодном изменении объёма выпуска и долговечности картина усложняется. Однако общая закономерность остаётся в силе: повышение долговечности *(в пределах срока технической долговечности)* всегда сопровождается увеличением в последующие годы фактической численности машинного парка, пропорциональным размеру годового выпуска и величине долговечности.

4.3 УДЕЛЬНЫЕ ЕДИНОВРЕМЕННЫЕ ЗАТРАТЫ НА СОЗДАНИЕ И ОСВОЕНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ (СОИТ) И КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО K_{II}

Затраты на *СОИТ* включают затраты на научно-исследовательские работы, конструирование и опытные работы, разработку технологических процессов, проектирование оснастки и т.д. по соответствующим сметам. В сметной калькуляции планируются затраты организации или предприятия при выполнении этапов данной темы по следующим статьям затрат:

а) прямые затраты: материалы, полуфабрикаты, готовые изделия; основная заработная плата; контрагентские затраты (т.е. затраты организаций-соисполнителей, оплачиваемые данной организацией или предприятием); спецзатраты (например, затраты на специальное оборудование, стенды и т.д.); командировки; прочие прямые затраты;

б) накладные расходы.

В основе калькуляции расчёт расхода материалов, спецификации на покупные изделия и полуфабрикаты, плановая трудоёмкость работ по этапам и по категориям персонала, хозрасчётные договора с другими организациями, план по командировкам, смета затрат на обслуживание и

управление. При этом широко используют данные о трудоёмкости и фактических затратах на аналогичные работы, законченные ранее, о средних затратах на одного работника и т.д. Подсчитывают дифференцированно по статьям затрат (при наличии соответствующей исходной информации) или прогнозируют укрупнению, используя рассмотренные выше методы.

Приближённые расчёты требуемых единовременных затрат на создание и освоения новой техники (*СОИТ*), а также капитальных вложений в производство выполняют на основе отраслевых (или заводских) нормативов. Этот способ может быть использован на предпроектной и ранних стадиях проектирования, когда ещё неизвестен состав нового оборудования цехов и участков. Могут быть установлены или значения удельных единовременных затрат, или, в целях их уточнения, системы балльной оценки, или многофакторные регрессионные модели, позволяющие получить значение удельных единовременных затрат в виде интегрального показателя.

Если часть единовременных затрат производится через сравнительно большие промежутки времени по отношению к году, в котором производятся расчёты, то их величину в соответствии с методиками [13, 14] необходимо скорректировать с учётом фактора времени, поскольку в связи с ростом производительности общественного труда величина требующихся средств будет уменьшаться. Приведение затрат более поздних лет к текущему моменту производится с помощью коэффициента приведения, B_t :

$$B_t = \frac{1}{(1 + E_n)^t}, \quad (4.13)$$

где t — период времени приведения, годы;

E — нормативный коэффициент для приведения разновременных затрат, $E_n = 0,1$.

Скорректированная величина удельных единовременных затрат в K_p t -м году, приведённая к расчётному периоду

$$K_{pt} = B_t K_t,$$

где K_t — часть удельных единовременных затрат, приходящаяся на t -й год после расчётного;

B_t — коэффициент приведения для t -го года.

Общая скорректированная величина удельных единовременных затрат, руб./шт.,

$$K_{nn} = K_1 + \sum_{i=1}^n K_{pti}, \quad (4.14)$$

где K_1 — часть удельных единовременных затрат, производимых в первый год и не подвергаемых корректировке;

n — число лет последующего периода, в которые производятся единовременные затраты K_n .

Для последующего сравнительного ТЭА известные удельные единовременные затраты по базовому изделию корректируют на условия одинакового объёма выпуска.

Аналогично определяют при необходимости и *сопутствующие капиталовложения в сфере эксплуатации* K_s .

Технико-экономические показатели машин в сфере эксплуатации весьма специфичны и зависят не только от вида машины (автомат, станок, автомобиль, насос и др.), но даже от её разновидности (грузовой или легковой автомобиль). Поэтому для расчёта производительности, надёжности, эксплуатационных затрат S_s необходимо использовать специальную методическую литературу (отраслевые и заводские методики, методики ТЭА по видам машин и т.д.). При этом для прогнозирования в основном используют рассмотренные выше методы.

При переходе от стадий разработки ТЗ и технического предложения к следующим стадиям проектирования накапливается всё большая информация по проектируемой машине. Это позволяет не только уточнить расчёты экономических показателей (K_n , S , S_s , K_s), отразить в этих расчётах конструкционные особенности данной машины, но и более полно осуществить обратную связь — дать возможность оценить степень влияния изменения отдельных парамет-

ров, например на себестоимость. При этом можно выявить рациональные пределы таких изменений в данном классе машин.

Поэтому, например, для более точных ТЭА и ТЭО необходимо, начиная с эскизного проектирования, прогнозирование себестоимости проектируемой машины вести предварительно по её основным сборочным единицам. Затем следует учесть не рассмотренные при подробном анализе затраты, в частности на общую сборку. В результате можно получить уточнённую себестоимость всей машины. В случае изготовления каких-либо сборочных единиц на заводах-смежниках или при получении каких-либо сборочных единиц с других заводов в порядке кооперации в формулу вместо их себестоимости нужно подставить оптовую цену, p .

$$S_n = \mu \left(\sum_{i=1}^m n S_{c\sigma i} + \sum_{i=1}^p r \Pi_{c\sigma i} \right). \quad (4.15)$$

где μ — коэффициент, учитывающий затраты на общую сборку и себестоимость изготовления неучтённых элементов конструкции;

m — номенклатура основных сборочных единиц собственного изготовления;

n — число одноимённых сборочных единиц данного вида (собственного изготовления);

$S_{c\sigma i}$ — себестоимость сборочной единицы собственного изготовления с учётом объёма выпуска, p ;

$\Pi_{c\sigma i}$ — оптовая цена сборочной покупной единицы с учётом возможного изменения объёма выпуска, p ;

p — номенклатура покупных сборочных единиц;

r — число одноимённых покупных сборочных единиц данного вида.

В отдельных случаях, особенно при создании оригинальных сборочных единиц, агрегатов и узлов, не имеющих аналогов, на стадии рабочего проектирования с помощью рабочих чертежей и опытных образцов уточняют получен-

ные значения себестоимости (р.) сборочной единицы путём проведения подетальных расчётов:

$$S_{снб} = \mu \left(\sum_{i=1}^m n S_{дi} + \sum_{i=1}^p r \Pi_{дi} \right), \quad (4.15^*)$$

где μ — коэффициент, учитывающий затраты на сборку;

m — номенклатура основных деталей собственного изготовления в сборочной единице;

n — число одноимённых деталей данного вида (собственного изготовления) в сборочной единице;

$S_{дi}$ — себестоимость детали собственного изготовления с учётом объёма выпуска, р.;

p — номенклатура покупных деталей;

r — число одноимённых покупных деталей данного вида в сборочной единице;

$\Pi_{дi}$ — оптовая цена покупной детали с учётом возможного изменения объёма выпуска, р.

Значения $\Pi_{сбi}$ и $\Pi_{дi}$, могут быть найдены по ведомости кооперированных поставок, составленной в соответствии с прейскурантами и договорами.

Капиталовложения в производство *новой техники* должны учитывать:

- *первоначальную* (балансовую) стоимость новых основных фондов, требующихся для освоения производства: стоимость нового оборудования с учётом затрат на доставку и монтаж, затраты на модернизацию действующего оборудования применительно к условиям производства проектируемого изделия, стоимость строительства и реконструкции зданий и сооружений, а также стоимость технологической оснастки со сроком службы более года;
- *остаточную* стоимость действующих основных фондов (неамортизированную часть их стоимости), которые ликвидируются в связи с постановкой на производство проектируемой машины и не могут быть использованы по другому назначению, при этом должна учитываться их ликвидационная стоимость;

- остаточную стоимость имеющегося оборудования и производственных помещений, не нужных для выпуска проектируемой машины и используемых для других производственных целей.

Для последующего ТЭА итоговая величина капиталовложений приводится к удельному значению, делится на годовой объём выпуска продукции (р./шт.), последний представляет собой среднегодовой выпуск продукции (после окончания периода освоения) за период нормативного срока окупаемости (величина, обратная E_n), а в случае отсутствия таких данных на выпуск продукции во второй год после окончания периода освоения.

Как бы совершенна ни была зависимость, разработанная для расчёта того или иного показателя, погрешность в полученных результатах неизбежна. Это даёт накапливающуюся ошибку в расчёте затрат за жизненный цикл и экономического эффекта. В результате расчёты, связанные с обоснованием новой техники, не позволяют дать однозначного решения.

Большое число промежуточных расчётов, требующихся для определения всех видов затрат и экономического эффекта, заставляет учитывать ещё одну характерную особенность ТЭА. Поскольку объём исходной информации по проектируемой машине весьма ограничен (особенно на предпроектной и ранних стадиях проектирования), для расчётов используют статистический материал по машинам аналогичного назначения и методы математической статистики.

Таким образом, при расчётах технико-экономической эффективности необходим вероятностный подход, а итоговые результаты расчётов следует рассматривать как вероятностные оценки. Так, получение расчётного, как детерминированного, экономического эффекта $\mathcal{E}$ в размере 3,2 млн. р. может быть гарантировано только с вероятностью β не более 0,4. Расширяющийся при увеличении требуемой вероятности экономический допуск Δd на неточность прогнозирования говорит о том, что при $\beta = 0,8$ в данном проекте могут быть потери более 4 млн. р.

4.4 ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ (ФСА — АНАЛИЗ)

Большую роль в технико-экономическом обосновании параметров машин и отдельных элементов этих машин при проектировании играет функционально-стоимостной анализ (ФСА). Одним из главных положений ФСА конструкций является то, что в каждой конструкции имеются излишние затраты, т.е. *резервы снижения себестоимости*. При описании потребительских свойств конструкции машины в этом методе используется *функциональный подход*, т.е. машина рассматривается не как совокупность составляющих её элементов, а как объект реализации различных функций, в том числе и ненужных, затраты на выполнение которых составляют часто 5–10 % себестоимости машины.

В методологии ФСА используют форму коллективного поиска лучших решений — мозговой штурм, конференция идей, морфологический анализ, метод контрольных вопросов и др. [1, 13]. Материальным объектом ФСА служит часто не машина в целом, а отдельные элементы — агрегаты, узлы и даже наиболее ответственные и дорогие детали.

Нормативные документы по организации и проведению ФСА предусматривают несколько последовательных этапов: подготовительный, информационный, аналитический, творческий (исследовательский), рекомендательный и, наконец, этап внедрения.

Подготовительный этап, занимающий, как правило, всего 4–8 % в общей трудоёмкости работ, предусматривает предварительное обучение специалистов основам ФСА, выбор объекта исследования и определение целей анализа, подготовку перечня информационных материалов, подбор и утверждение состава исследовательской группы и другие организационные мероприятия.

Для решения задач ФСА на этом этапе создают временные группы конструкторов, технологов, экономистов. В качестве первоочередных объектов берут сборочные единицы или детали с большой себестоимостью, недостаточно технологичные.

Информационный этап включает в себя сбор и систематизацию технико-экономической информации по исследуемому объекту и аналогичным изделиям, построение схемы взаимосвязей составных частей, выявление затрат на его создание и функционирование. На этом этапе анализируют требования к параметрам, указанные в стандартах, ТУ, инструкциях, строятся графики, отражающие структуру себестоимости, материалоемкости, трудоёмкости. От полноты и достоверности собранной информации во многом зависит успех последующих этапов ФСА.

Одним из самых главных является *аналитический этап*. Он основывается на классификации функций, выполняемых объектом исследования (рис. 39), разграничении и анализе затрат, связанных с осуществлением функций, сравнении с функциями и затратами по другим аналогичным изделиям. Ставится задача поиска идей и вариантов улучшения конструкторских решений. При этом широко используют теорию графов, метод дерева целей, экспертные оценки, другие методы прикладной математики. Последовательность проведения работ на этом этапе примерно следующая.

1. Строят структурно-элементную модель объекта анализа.
2. Определяют его функции (рис. 37).
3. Выявляют назначение материальных носителей (узлов, деталей) в выполнении функций.
4. Строят иерархическую *функциональную* модель объекта исследования: выявляют бесполезные функции (F_{24}) и отбрасывают их; при этом экспертным путём устанавливают относительную значимость функций как на данном уровне иерархии, так и в обеспечении выполнения функции бо-

лее высокого порядка, причём $\sum_{i=1}^n r_{ij} = 1$, где r_{ij} — значимость

j -й функции на i -м уровне; n — общее число функций на i -м уровне;

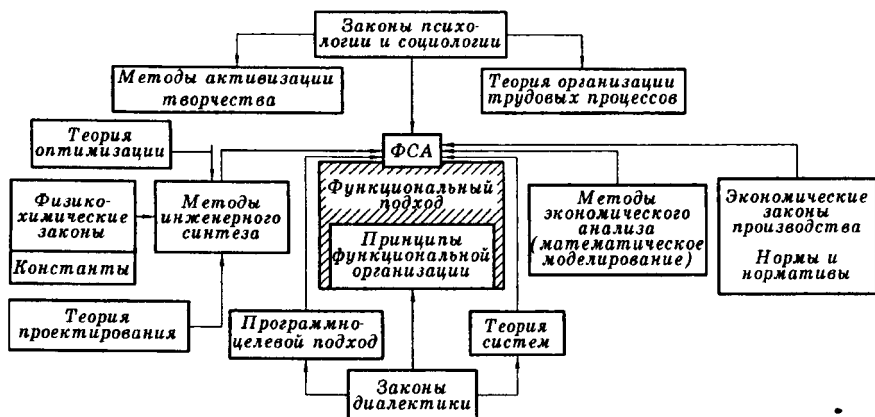


Рис. 37 ФСА в системе методов и теорий анализа

Относительная значимость каждой функции в реализации главной функции

$$R_{ij} = \prod_{i=1}^q r_{ij},$$

где $\prod_{i=1}^q r_{ij}$ — произведение значимости функции;

r_{ij} , q — число уровней функциональной модели.

5. Экспертным путём определяют значимость материальных носителей в обеспечении выполняемых функций в виде коэффициента значимости α_{ij} ; если для обеспечения какой-либо функции требуется один материальный носитель, то $\alpha_{ij} = 1$; если он участвует в обеспечении нескольких функций, то $\alpha_{ij} < 1$

$$\sum_{i=1}^v \alpha_{ij} = 1, \quad (4.16)$$

где v — число функций, обеспечиваемых данным материальным носителем.

6. Выявляют затраты на материальные носители и распределяют их по функциям, при этом определяют абсолютную величину стоимостного вклада материального носителя в осуществление данной функции:

$$S_{\phi ij} = \sum_{i=1}^m (S_{\text{мн}i} \alpha_{ij}), \quad (4.17)$$

где $S_{\text{мн}i}$ — себестоимость материального носителя (детали, сборочной единицы);

m — число материальных носителей, реализующих ij -ю функцию;

определяют относительную стоимость функции

$$S_{\text{ом}ij} = S_{\phi ij} / S,$$

где S — себестоимость (или оптовая цена C) объекта ФСА.

7. Строят функционально-стоимостную диаграмму, определяют точки рассогласования между относительной стоимостью функций и их относительной значимостью, т.е. функции, для которых $R_{ij} < S_{\text{ом}ij}$ (функция F_{21} , рис. 38);

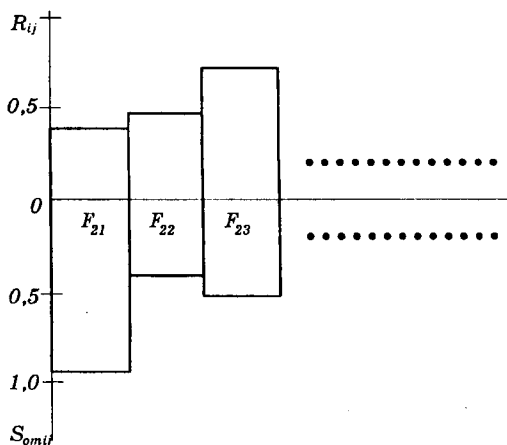


Рис. 38 Функционально-стоимостная диаграмма объекта исследования

материальные носители, обеспечивающие выполнение этих функций, должны быть в первую очередь подвергнуты конструкторской доработке на следующем этапе ФСА.

На *исследовательском этапе* проводят систематизацию предложенных вариантов конструкторских решений, исключают абсурдные или невыполнимые в настоящее время по условиям материально-технического, финансового или производственного обеспечения. Затем определяют затраты и экономичность выполнения функций в разных вариантах решений, проводят ранжирование вариантов и выбор наилучшего. Этот этап является решающим в ФСА, так как в ходе его проведения рождается улучшенный вариант конструкции. В процессе выполнения рекомендательного этапа оформляют рекомендации по выбранным вариантам конструкторских решений с уточнёнными расчётами экономической эффективности. Эти рекомендации утверждает руководство и передают соответствующим службам, составляется план-график их выполнения.

На *этапе внедрения* необходимо предусмотреть контроль за соблюдением плана-графика, меры по поощрению участников разработки и внедрения рекомендаций, оценить полученные результаты и оформить отчёт о проделанной работе. Примеры использования ФСА в конструкторской практике см. [17].

Выводы по результатам технико-экономического анализа (ТЭА) и затрат на СОНТ

Общий вывод: увеличение полезной отдачи и долговечности — наиболее эффективный и выгодный способ увеличения объёма промышленной продукции и повышения экономического эффекта машин.

Увеличение долговечности позволяет пропорционально сократить годовой выпуск машин без снижения объёма промышленной продукции, при уменьшении общей стоимости изготовления машин, значительном снижении эксплу-

атационных расходов, повышении рентабельности производства.

Правилен и обратный вывод: увеличение долговечности машин при том же объеме выпуска машин, тех же производственных мощностях и затратах на изготовление машин позволяет пропорционально увеличить оснащённость народного хозяйства машинами и повысить объем промышленной продукции.

Увеличение долговечности как способ повышения численности машинного парка и объема продукции несравненно выгоднее, чем простое увеличение выпуска машин, не сопровождаемое повышением их долговечности.

Увеличение выпуска машин требует введения новых предприятий, расширения площадей и оборудования существующих предприятий. Кроме этого возрастают эксплуатационные расходы вследствие увеличения числа действующих машин.

Увеличение отдачи и долговечности машин, как правило, сопровождается относительно небольшим повышением стоимости машин и вместе с тем, в связи с сокращением числа действующих машин, уменьшаются эксплуатационные расходы. Конечный результат тот же: *увеличение фактической численности парка действующих машин и увеличение объема промышленной продукции, но при несравненно меньших затратах в общем значительном возрастании экономического эффекта.*

Целесообразно сочетать увеличение численного выпуска с увеличением полезной отдачи и долговечности машин, а в нужных случаях и умерять численный выпуск, отдавая предпочтение более выгодному способу увеличения отдачи и долговечности машин.

Из сказанного вытекает важный *вывод*. Увеличение годового выпуска машин ещё не означает увеличения численности действующих машин и объема выпуска промышленной продукции. Возрастание годового производства машин характеризует рост экономики только в том случае, если

оно сопровождается объективными данными о долговечности и качестве выпускаемых машин. Эти данные могут означать: *прогресс*, если долговечность машин сохраняется на постоянном уровне или повышается; *застой*, если долговечность снижается в такой же пропорции, в какой возрастает выпуск; *регресс*, если долговечность машин падает более существенно, чем возрастает их выпуск.

Проектируемая машина прежде всего должна иметь эксплуатационные характеристики на уровне аналогичных характеристик лучших перспективных отечественных и зарубежных машин или, желательно, превосходить их. Только выполнение этих условий позволяет перейти к рассмотрению экономических критериев качества проектируемой машины.

Основным экономическим критерием принятия решений является максимум экономического эффекта или минимум затрат за весь жизненный цикл машины. Исключительно важную роль играет рассчитанная при ТЭА *лимитная цена*, так как, начиная с ТЗ, она позволяет конструкторам постоянно следить за экономностью тех или иных решений, соотнося их с лимитной ценой.

Показатели унификации хотя и играют вспомогательную роль, но также необходимы в оценке экономической эффективности машины, особенно когда при анализе вариантов остальные показатели оказываются примерно одинаковыми. В этом случае более высокие показатели унификации одного из вариантов могут сыграть решающую роль в принятии решений, так как этот вариант обеспечит быструю и экономичную технологическую подготовку производства и быстрое наращивание выпуска до планового уровня.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Перечислите основные критерии экономичности использования машины.

2. От каких факторов зависят экономические показатели эксплуатации машины?
3. Чем выражается рентабельность машины?
4. Какая методология используется для оценки экономичности конструкции машины или её отдельных узлов?
5. Поясните связь долговечности машины и экономического эффекта её использования.
6. Каким образом можно регулировать численность машинного парка?
7. Перечислите наиболее эффективные пути управления экономическими показателями при использовании машинного парка.

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ (КД)

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На рисунке 39 изображён вал коробки скоростей с подшипниками и зубчатым колесом. Основными элементами вала являются: 1 — фаски; 2 — шейки для зубчатого колеса и подшипников; 3 — проточки; 4 — бурт; 5 — шпоночный паз; 6 — центровые отверстия на торцах вала

Конструктивные формы деталей образуются сочетанием различных геометрических поверхностей. Отдельные такие поверхности являются элементами деталей. Ни одна деталь не может быть сконструирована вне сборочной единицы машины, в которую она входит. Поэтому детали получают свои формы и размеры в процессе разработки конструкций сборочных единиц.

Шейки, бурт и шпоночные пазы сопрягаются (соединяются) с соответствующими элементами других деталей сборочной единицы. Их размеры, форма и расположение согласованы с сопряжёнными деталями и установлены исходя из расчётных и конструкторских соображений, определяемых значением и работой узла. Такие элементы принято называть конструктивными.

Возникновение других элементов — фасок, проточек, центровых отверстий обусловлено технологическими требованиями удобства изготовления детали и сборки её с другими. Так, фаски на детали необходимы для удобства сборки деталей (без задира торцов). Проточки нужны для выхода шлифовального круга при шлифовании шеек вала, а центровые отверстия служат базой при обработке вала (вал устанавливается на станке в центрах). Элементы деталей, связанные с операциями их изготовления, называют *технологическими*.

Из рассмотренного примера видно, что способы изготовления часто требуют введения в их конструкцию элементов исключительно технологического характера. Но иногда один и тот же элемент может быть и конструктивным, и технологическим.

С точки зрения применяемости и распространения в машиностроении, детали можно разделить на стандартные, унифицированные и оригинальные.

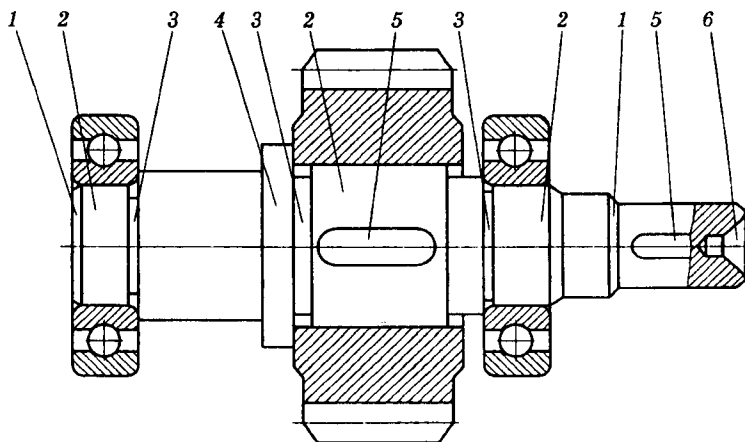


Рис. 39 Типовая конструкция узла «Вал ведущий»

К стандартным относятся детали, поставляемые по государственным, республиканским и отраслевым стандартам, а также стандартам предприятия. К унифицированным относят заимствованные из другого изделия, т.е. ранее спроектированные как оригинальные. Оригинальные детали конструируют применительно к определённой машине и они, как правило, не имеют подобного себе образца.

Создание машины — сложный творческий процесс, не имеющий однозначного решения. Одну и ту же деталь и машину можно сконструировать в нескольких вариантах. К новой конструкции предъявляется большое количество разнообразных и часто противоречивых требований: наи-

меньшая масса, необходимая долговечность, прочность, определённые габариты, низкая стоимость, простота обслуживания и др. Одновременно выполнить все условия в большинстве случаев невозможно, и решение почти всегда бывает компромиссным.

Формо- и размерообразование деталей на практике осуществляется с помощью разнообразных технологических процессов. Чертёж детали, как правило, заранее предопределяет технологию её изготовления. При выборе окончательного решения из многих вариантов останавливаются на том, который, если судить по чертежу, является наиболее технологичным. По ГОСТу 14.205, *технологичность конструкции изделия* — это совокупность её свойств, проявляемых в возможности осуществления оптимальных (наиболее выгодных технико-экономических) затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, при изготовлении, эксплуатации и ремонте.

5.2 ОТРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ИЗДЕЛИЙ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

Основная задача отработки конструкции на технологичность заключается в повышении производительности труда при оптимальном снижении затрат труда, средств, материалов и времени на проектирование, подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт, обеспечении прочих заданных показателей качества изделия в принятых условиях его производства и эксплуатации. Для выполнения этой задачи необходимо:

- обеспечить обязательность отработки на технологичность конструкции изделия на всех стадиях его проектирования, производства и эксплуатации;
- определить показатели, которые могут быть критериями оценки технологичности конструкции;
- определить методы отработки конструкции на технологичность различных видов изделий на всех стадиях проектирования;

- обеспечить единство терминов и определений, используемых при рассмотрении технологичности конструкций изделия.

В основу заложены принципы и требования, изложенные в ГОСТе 14.201. Методика учитывает опыт отработки конструкции изделия на технологичность в различных отраслях машиностроения, наиболее универсальные и перспективные решения элементов этой большой проблемы. Обязательность отработки конструкций изделий на технологичность на всех стадиях их создания устанавливается стандартами ЕСТП.

Количественная оценка технологичности конструкции основана на системе показателей технологичности, являющихся критериями технологичности. Оценка технологичности конструкции изделия, согласно ГОСТу 14.201, основана на трёх видах показателей:

- базовые показатели технологичности, значения которых регламентированы в обязательном порядке соответствующей директивной документацией на изделие (ТЗ и пр.);
- показатели проектируемой конструкции, достигнутые в процессе отработки конструкции на технологичность;
- показатели уровня технологичности конструкции изделия, значения которых регламентированы соответствующей директивной документацией, обуславливающей производство (изготовление) изделия (ТУ и пр.).

Виды технологичности, виды оценки и главные факторы, определяющие технологичность конструкции изделия, представлены на схеме. При рассмотрении схемы следует учитывать, что технологичность заготовки в общем случае рассматривается в совокупности с конструкцией детали.

По области проявления свойств технологичности конструкции изделия различают виды технологичности: производственную, эксплуатационную.

Производственная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на:

- конструкторскую подготовку производства (КПП);
- технологическую подготовку производства (ТПП);
- процессы изготовления.

Эксплуатационная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Главные факторы, определяющие требования к технологичности конструкции изделия, характеризуются конструктивно-технологическими признаками изделия, объёмом выпуска и типом производства. Вид изделия определяет главные конструктивно-технологические признаки. Производство принято делить на следующие типы:

- единичное (в том числе опытное производство);
- серийное — массовое.

Вид оценки — фактор, характеризующий метод сравнения вариантов конструкции и обоснованный выбор оптимального варианта конструкции.

Различают следующие виды оценок:

- количественная оценка;
- качественная оценка.

Понятие технологичности трактуется в машиностроении весьма широко и может быть сформулировано в следующем виде: *задачей технологичности конструкции является назначение при конструировании машины таких форм, точности изготовления и технических качеств деталей, а также выбор таких материалов, заготовок и технологических процессов и назначение таких сопряжений деталей в сборочные единицы и в машину, которые в сочетании обеспечивали бы достижение: оптимальных конструктивных параметров, требующих физических и технических свойств деталей и машины в целом; наиболее простого, производительного и экономичного, производственного процесса изготовления машин; наиболее высоких эксплуатационных качеств машины и её узлов.*

Технологичность конструкции — понятие комплексное, не поддающееся однозначной количественной оценке с по-

мощью какого-либо коэффициента. В то же время это понятие условно, так как оценивать технологичность конструкции нужно с учётом особенностей организационных форм производства (индивидуальное, серийное, массовое), а нередко также конкретной производственной обстановки и установившихся технологических традиций.

Технологичность не является универсальным состоянием спроектированной детали или машины. Она меняется в зависимости от технологических возможностей завода-изготовителя.

Для завода с мощной литейной базой наиболее технологичным может быть литой вариант (рис. 40, I, III); для завода металлоконструкций — сварной (рис. 40, II, IV). Технологичность в большей степени зависит от серийности производства. В индивидуальном производстве наиболее удобной бывает сварка. На рисунке 40, II, IV показаны два

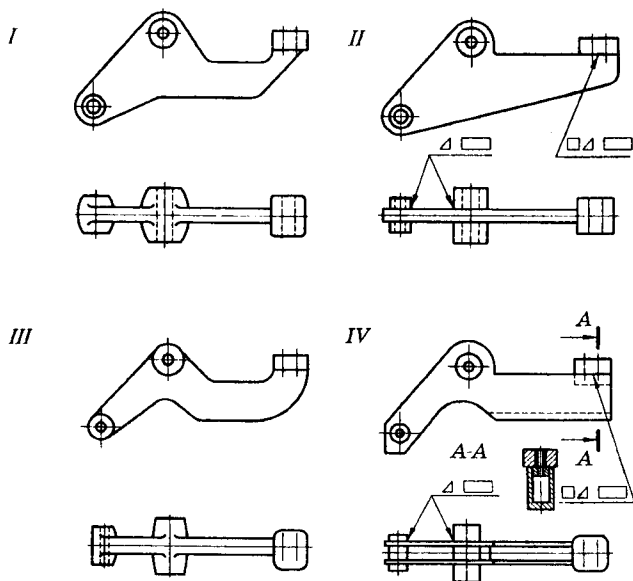


Рис. 40 Примеры конструкции изделия технологичного в различных условиях производства

варианта сварной конструкции рычага. Последний представляет собой облегчённую конструкцию. В обоих случаях отдельные элементы детали — две втулки и пята — привариваются к фигурной планке.

В серийном производстве для крупногабаритных деталей наиболее удобно литьё в землю (рис. 40, I), в крупносерийном — литьё в кокиль или оболочковые формы (рис. 40, III). Отсюда принцип технологичности требует создания деталей машин, наиболее приспособленных к определённым условиям технологии производства.

Для всех видов изделий по ГОСТу 14.201 — при отработке конструкции на технологичность ставятся следующие задачи:

1 — снижение трудоёмкости изделия. Она зависит от многих факторов, основными из которых следует считать унификацию составных частей и их элементов, типизацию технологических процессов изготовления, технического обслуживания и ремонта изделия.

2 — стандартизация составных частей изделия, являющихся сборочными единицами (блоки, агрегаты) или деталями (креплёжные изделия и др.), использование в конструкции изделия стандартных составных частей, обеспечивается их взаимозаменяемость;

3 — унификация составных частей изделия. Она включает: использование в проектируемых изделиях составных частей конструкций, отработанных на технологичность и освоенных в производстве, сокращение количества наименований и типоразмеров (гл. I, п. 1 и 4), составных частей изделия и применяемых материалов;

4 — унификация элементов конструкции деталей. Это касается посадок, классов точности, шероховатости поверхностей, резьб, шлицев, шпонок, модулей зубьев, диаметров отверстий и др.;

5 — возможность применения типовых технологических процессов сборки, обработки, контроля, испытаний, технического обслуживания и ремонта. Применение типовых тех-

нологических процессов создаёт условия для повышения уровня его механизации и автоматизации, сокращения сроков изготовления, обслуживания и ремонта изделий.

Последовательность решения задач технологичности конструкции на различных стадиях проектирования приведена на рисунке 41. Из рисунка 41 видно, что наибольшее значение (до 80 %) имеют конструктивные решения на первых стадиях проектирования, когда определяются основные конструктивно-технологические признаки конструкции, предопределяющие в основном её технологичность.

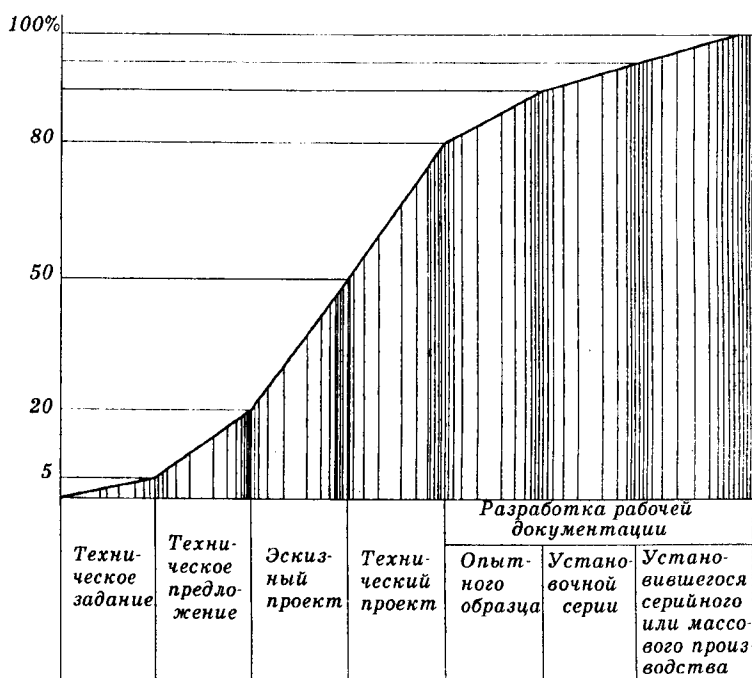


Рис. 41 Схема решения задач технологичности на различных этапах проектирования

Накопленный опыт в области технологии машиностроения позволил наметить конкретные примеры конструктивных решений, которые могут рассматриваться как ре-

комендации, заслуживающие внимания при проектировании деталей, сборочных единиц, машин и механизмов. Конструкторы в большинстве своём люди, обладающие образным мышлением и хорошей зрительной памятью. Для них чертежи и эскизы говорят гораздо больше, чем многие страницы объяснений. Поэтому почти каждое положение, приводимое ниже, сопровождается конструктивными примерами.

5.3 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ И КОНСТРУКТИВНАЯ ФОРМА ДЕТАЛИ

Существует ряд критериев, последовательное применение которых как к отдельным деталям, так и к машине, механизму в целом, позволяет с достаточной степенью объективности оценивать уровень их технологичности. Далее приводится краткая характеристика этих критериев, которые в то же время могут рассматриваться как рекомендации при проектировании деталей, сборочных единиц, машин и механизмов.

Несколько примеров с целью доходчивости подобрано по принципу сопоставления неправильных и правильных, нецелесообразных и целесообразных конструкций. Приводимые правильные решения, не являются единственно возможными. Их следует рассматривать лишь как примеры. В конкретных условиях производства могут оказаться целесообразными и другие решения.

Технологичность как экономическая целесообразность

При проектировании деталей машин для повышения технико-экономических показателей следует учитывать стоимость материалов, расходуемых на деталь, и, следовательно, себестоимость её изготовления. Критериями оценки затрат на материалы служат чистая масса деталей и норма расхода материала на их изготовление.

Чистая масса детали зависит от её конструкции и величины действующих на неё (в рабочем состоянии) усилий, а *норма расхода* материала — от способа изготовления детали. Отношение чистой массы детали к норме расхода материала называется коэффициентом использования материала.

Значение коэффициента расхода материала во многом зависит от производственных условий и геометрической формы детали. Коэффициент использования материала определяется отношением чистого веса готовой детали к весу заготовки. Если коэффициенты расхода материала применяются при расчётах потребности в материале для изготовления заданного количества деталей или комплектных машин, то коэффициент использования материала является экономическим показателем технологичности конструкции комплектной машины и особенно её деталей, а также показателем технического уровня производства.

Ниже приведены основные пути снижения себестоимости конструкции:

1 — для уменьшения расхода дефицитного металла на изготовление крупногабаритной детали необходимо заранее предусмотреть возможность сделать её составной путём выполнения неотвественных элементов деталей из простых и дешёвых металлов (рис. 42, I, II);

2 — для уменьшения расхода материала, затрат времени на обработку и снижения массы литых заготовок ненагруженных или малонагруженных деталей следует заранее предусмотреть внутренние полости, отверстия, выемки и т.д. (рис. 42, III);

3 — выбор рациональной формы сечения детали не только позволяет сделать её более прочной, но и приводит часто к снижению производственных затрат на её изготовление. Например, изменения формы сечения рукоятки гаечного ключа и его длины (рис. 43) приводит к экономии металла на 22 %. Лучшее использование механических свойств материала позволяет уменьшить размеры изделия, сделать его

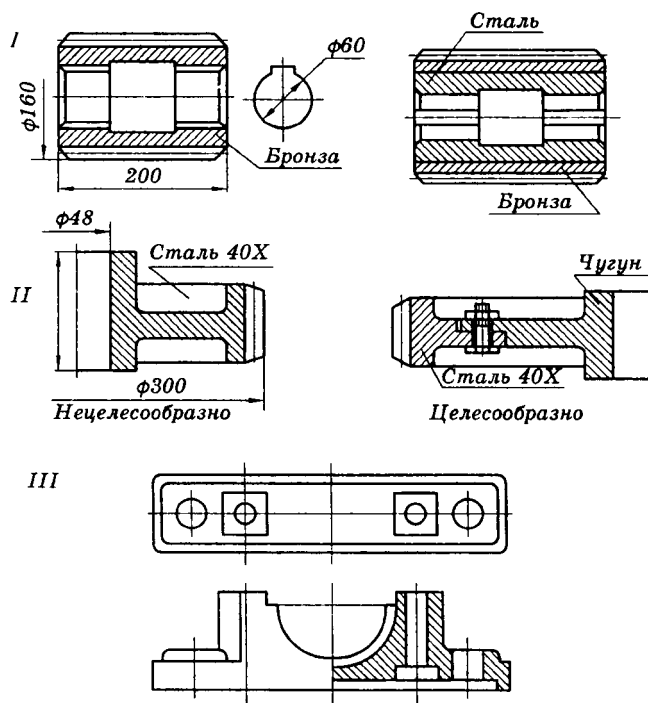


Рис. 42 Примеры конструкций технологичных и нетехнологичных изделий

форму более красивой и повысить экономичность изготовления.

4 — в рациональной технологии изготовления детали, которая уменьшает отходы материала, а значит, и себестоимость готовой продукции. Например, изготовление болтов М10 из круглого прутка на современных холодно-высадочных автоматах позволяет сократить отходы металла в 2,4 раза по сравнению с изготовлением тех же болтов из шестигранного прутка на токарном автомате. На рисунке 43 показано сравнительное количество отходов металла при изготовлении болта методами холодной высадки с последующей накаткой резьбы (рис. 43, III) и на токарном автомате (рис. 43, III);

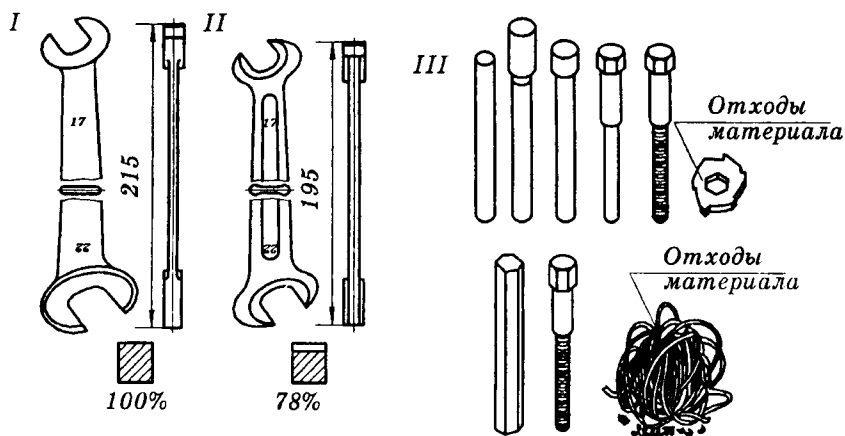


Рис. 43 Пример конструкции технологического и нетехнологического изделия

На рисунке 44 показан пример конструирования ступенчатого валика. В первом случае (рис. 44, I) из-за большой разницы диаметров валика, заготовка на его изготовление была выбрана с припуском на больший диаметр. Отсюда большой отход материала в стружку.

Применение кольца (рис. 44, II) позволяет сократить диаметр заготовки (припуск заготовки) и уменьшить расход материала.

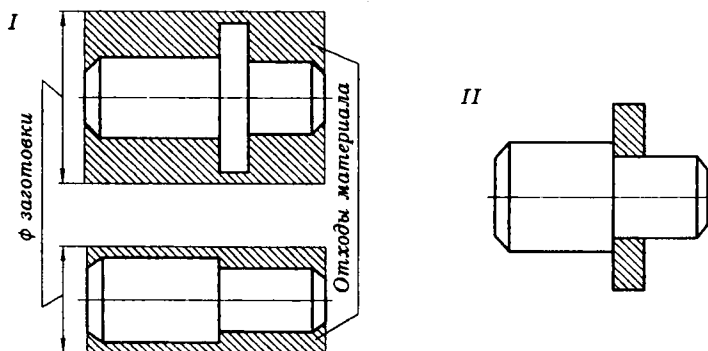


Рис. 44 Пример рациональной конструкции валика

6 — в необходимости избегать излишних требований к точности размеров, геометрических форм, степени шероховатости и взаимного расположения поверхностей, однако не вызывающих ухудшения эксплуатационных качеств машин. Повышенные требования приводят к увеличению трудоёмкости, а следовательно, и себестоимости их изготовления (рис. 45);

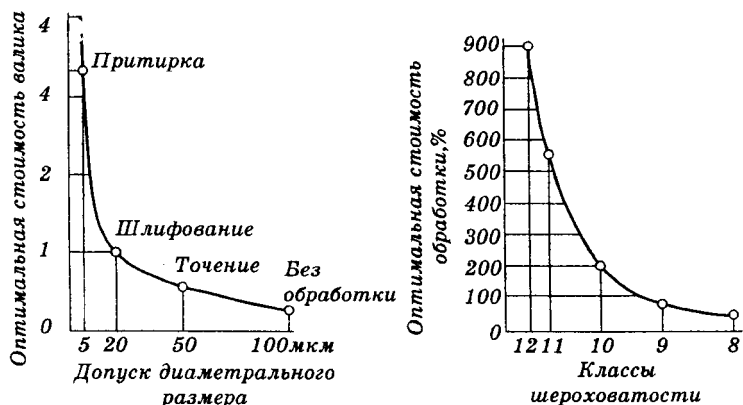


Рис. 45 Связь трудоёмкости и себестоимости изготовления с показателями качества изделия

5.4 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СБОРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РЕМОНТНАЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ

Основные требования технологичности сборочных соединений заключаются в следующем:

1 — для удобства и обеспечения нормальной сборки и контроля размеров пробками и скобками-калибрами на деталях предусматриваются фаски. В случае их отсутствия на деталях усложняется процесс соединения, что может привести к повреждению (задиру) сопрягаемых поверхностей (рис. 46, I);

2 — для обеспечения полного прилегания соприкасающихся деталей радиус закругления (галтели) делают меньше высоты фаски (рис. 46, II);

3 — центрировка деталей производится по одной поверхности, при этом следует избегать пригонки по нескольким поверхностям (рис. 46, I);

4 — при соединении деталей по коническим поверхностям на последних не должно быть никаких выступающих поясков, буртиков и т.д., так как это мешает правильной посадке и затяжке детали на конусе (рис. 46, II);

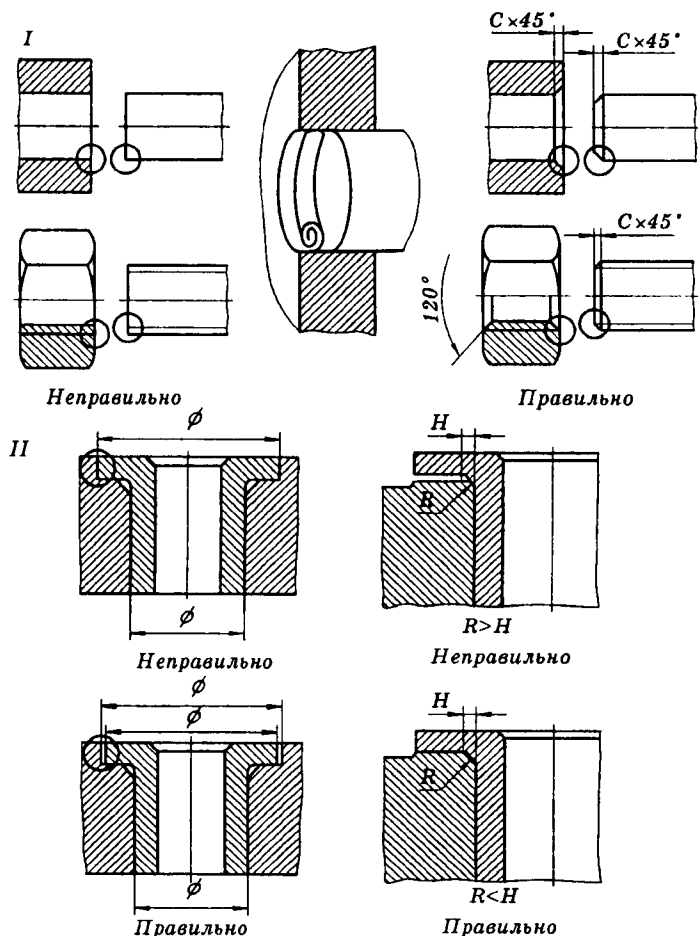


Рис. 46 Примеры конструкций технологичных и нетехнологичных изделий

5 — при соединении деталей с выступающими буртиками соприкосновение их следует обеспечивать только по одной поверхности. В этом случае будет гарантирована правильная посадка одной детали в другую и полная затяжка соединения (рис. 47, I);

6 — при правильной посадке шкива (подшипника, зубчатого колеса) на вал между торцами вала и ступицы шкива должен оставаться небольшой зазор (X), который дает возможность произвести затяжку соединения (рис. 47, II);

7 — при конструировании деталей, подлежащих соединению с помощью болтов, целесообразно предусматривать средства, предотвращающие поворачивание болта при затяжке (рис. 47, IV);

8 — чтобы облегчить сборку данной сборочной единицы, необходимо заранее предусмотреть последовательность посадки подшипников. Сначала осуществляется посадка одного из них в корпус, затем другого, за счёт разности расстояний (X) между подшипниками, смонтированными на валу и местами их посадки в корпусе (рис. 48).

Ремонтная технологичность конструкции — это, прежде всего, показатель её ремонтпригодности, т.е. показатель возможности проведения комплекса работ для поддержания и восстановления исправности и работоспособности изделия.

Технологичность конструкции изделия в связи с её дальнейшим ремонтом предусматривает удобство и сокращение трудоёмкости ремонтных работ, необходимых для восстановления работоспособности изделия, приспособленность изделия к восстановлению до первоначальных или ремонтных размеров с применением прогрессивной технологии восстановительных работ (например, использование сменных частей на быстроизнашивающихся деталях, возможность перестановки односторонне изнашивающихся деталей для их работы другой стороной и т.д.). При конструировании изделий необходимо заранее предусматривать возможность и удобство сборки и разборки их. Вот некоторые рекомендации:

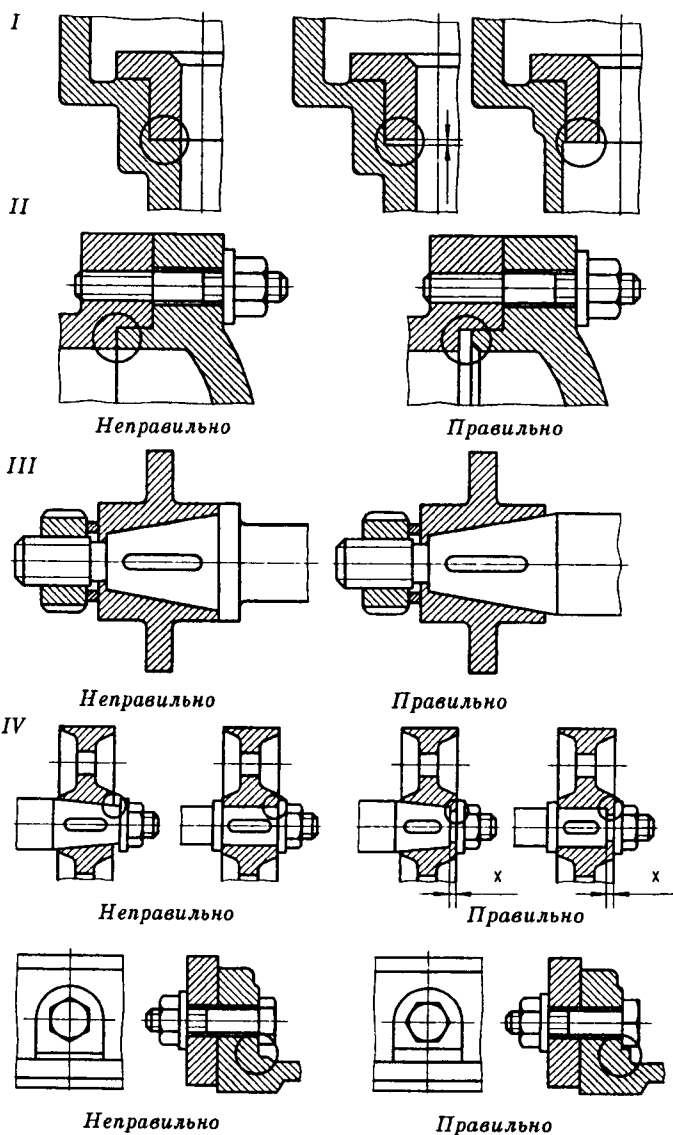


Рис. 47 Примеры конструкций технологичных и нетехнологичных изделий

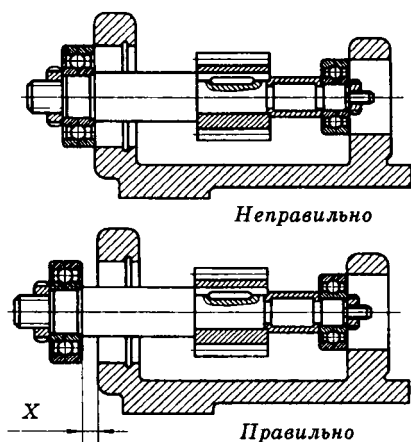


Рис. 48 Пример конструкции технологического и нетехнологического сборочного узла

1 — отверстия под цилиндрические штифты (при запрессовке их в вилку шатуна 2) надо выполнять сквозными. Это позволит выколачивать штифты 3 при переборках соединения, иначе их придётся высверливать (рис. 49, I), цифрами 1 и 4 обозначены поршень и втулка;

Примеры конструкций технологичных и нетехнологичных изделий

2 — чтобы наконечник можно снимать и надевать, не свинчивая зажимной гайки, ему надо придать форму вилки (рис. 49, II);

3 — необходимо заранее проектировать такое соотношение диаметров d_1 и d_2 вала, при котором подшипник 1 будет свободно проходить через посаженную на вал 3 шпонку 2, иначе при смене подшипника шпонку придётся выбивать, а затем снова устанавливать (рис. 49, III).

5.5 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ И ЭРГНОМИКА

В числе требований, предъявляемых к изделиям машиностроения, в последнее время всё большее значение приоб-

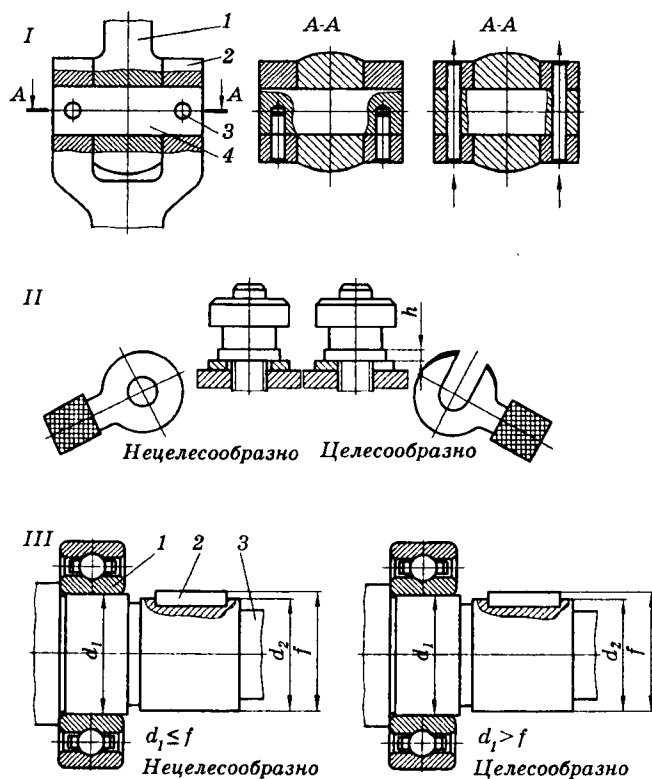


Рис. 49 Примеры констукций технологичных и нетехнологичных изделий

ретают требования эстетики, психологии, физиологии и безопасности труда. Практика показывает, что если изделие удачно решено с точки зрения технической эстетики и психологии, то оно обладает также техническими и технологическими достоинствами. Глубокий функциональный и эргономический анализ проектируемой конструкции обеспечивает правильность и надёжность работы изделий. На рисунке 50 приводится схема связей между функциональным назначением изделия, материалом, формой, размерами и прочими факторами.

В главе 2 уже упоминались два класса межотраслевой системы стандартов, касающиеся эргономики. Это 29-й класс — Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения, и 30-й класс — Система стандартов эргономики и технической эстетики (ССЭТЭ). Обе системы распространяются на используемые в производстве и быту изделия и устанавливают номенклатуру эргономических показателей качества промышленных изделий: гигиенические, антропометрические, физиологические, психофизиологические и психологические.

Для того чтобы различные машины, инструменты и приспособления не являлись источником профессиональных заболеваний и преждевременного утомления, а следовательно, и снижения производительности труда, чтобы работа на этих машинах и с инструментами доставляла удовольствие, необходимо соблюдать много различных требований.

Принцип эргономических требований — максимум внимания к человеку через конструкцию технического средства.

Учёт эргономических требований при конструировании

Учёт эргономических требований при создании техники позволяет наиболее эффективно функционировать системе человек — техника — среда, т.е. при минимальном расходе

ресурсов человека (время, уровень физиологического и психологического напряжения, здоровье) получать максимум удовлетворённости содержанием труда. Если не обеспечены наилучшие условия взаимодействия человека с техникой, то вряд ли можно рассчитывать на достижение экономического эффекта. Опыт показал, что до 30 % проектной

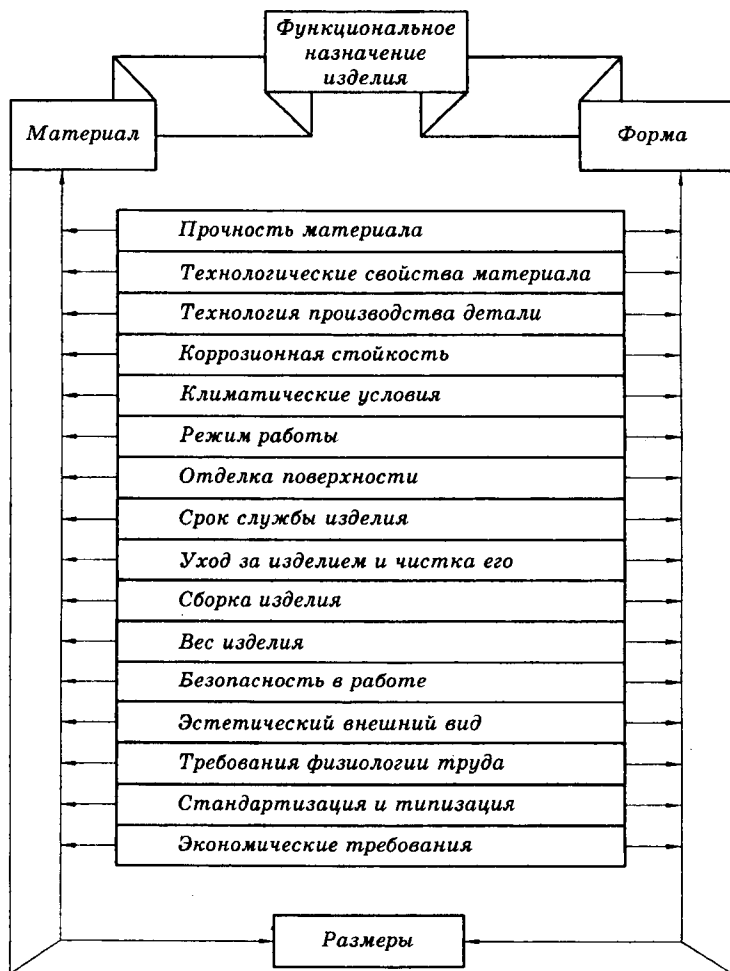


Рис. 50 Схема связи функционального назначения и конструктивно-экономических признаков изделия

эффективности техники не реализуется в процессе эксплуатации, если при создании машины не учитывается удобство работающего с ней человека.

Создание нерациональных и неудобных в управлении и обслуживании машин и оборудования влечёт за собой серьёзные социальные последствия. Трудящиеся, особенно молодёжь, неохотно работают на тракторах, станках и других машинах, если не обеспечены нормальные условия для безопасного и привлекательного труда.

Эргономическое обеспечение проектирования включает три этапа:

- обоснование (подбор) эргономических требований;
- реализация эргономических требований на стадии проектирования;
- оценка полноты и правильности реализации этих требований (эргономическая экспертиза и аттестация).

Основными видами эргономических требований являются: гигиенические, антропометрические, физиологические, психофизиологические и психологические.

Гигиенические требования определяют соблюдение норм метеорологической среды и микроклимата и ограничивают воздействие отрицательных факторов внешней среды, т.е. удовлетворяют важнейшие биологические потребности организма человека. Область безвредных и безопасных условий деятельности человека можно видеть на рисунке 51.

Антропометрические требования определяют соответствие изделия антропометрическим данным человека, размерам и форме человеческого тела. Они определяют также физиологически рациональную позу, способствующую наиболее эффективной деятельности человека.

Физиологические требования определяют соответствие изделия физиологическим свойствам человека, например биохимическим (силовым, скоростным).

Психофизиологические требования определяют соответствие изделия особенностям функционирования органов чувств человека (порог слуха, зрения, осязания и т.п.).

Психологические требования определяют соответствие изделия психологическим особенностям человека: восприятия, памяти, мышления, характеризующих его как существо социальное.

Свойства системы человек — машина — среда определяются структурными, функциональными, энергетическими и информационными взаимодействиями и отношениями и делятся на общие и специфические, существенные и несущественные, необходимые и случайные, совместимые и несовместимые и т.д. Общие свойства характерны для групп систем и носят межотраслевой характер, частные — для конкретных систем и являются отраслевыми.

Проектировщику для подбора необходимых эргономических требований надо чётко представлять весь массив информации. Обращение только к отраслевым стандартам, нормативным и руководящим материалам не является достаточным.

Эргономические требования, относящиеся к более низким уровням, таким как «технические средства деятельности», устанавливаются системой ГОСТов, поскольку они определяются более стабильными и консервативными антропометрическими и физиологическими свойствами человека. Такие эргономические требования поддаются количественному описанию, остальные могут быть представлены описательно на качественном уровне.

В настоящее время предлагаются различные классификации эргономических требований. Наиболее целесообразной является классификация эргономических требований по иерархическому предметно-функциональному принципу по ГОСТу 20.39.108.

Эргономические требования делят на группы:

- организация системы человек — машина;
- организация деятельности оператора;
- технические средства деятельности оператора.

Общие эргономические требования к организации системы человек — машина

Одной из главных задач, стоящих при выборе эргономических требований к организации системы человек — машина, является задача распределения функций в системе между человеком и машиной. На человека могут возлагаться различные функции в зависимости от того, какая это система человек — машина: система обнаружения, диспетчерская или система слежения и связи. Выбор функций производится с учётом возможностей человека и машины для выполнения конкретных операций, возможности загрузки человека, ответственности его за результат работы системы. При этом решают, обеспечит ли этот набор функций выполнение человеком принятых для него в данной системе социальных норм, касающихся ответственности за дос-



Рис. 51 Области безопасных условий деятельности человека

тижение целей деятельности, этики взаимоотношений между работающими людьми, и, наконец, обеспечит ли выбранный вариант соблюдение заданных для этой системы экономических ограничений (по стоимости систем, по количеству специалистов).

Эргономические требования к организации деятельности оператора

Эргономические требования включают комплекс требований, обуславливающих в основном информационное взаимодействие человека-оператора с технической частью системы человек-машина. Эргономические требования в этом случае представляют собой не конечные требования, а систему правил и положений, которые необходимо учитывать при проектировании.

По ГОСТу 26387 алгоритм деятельности представляет собой предписание, определяющее содержание и последовательность действий оператора в системе человек-машина.

Характерной чертой деятельности оператора является то, что он лишён возможности непосредственно наблюдать за управляемыми объектами и внешней средой, он работает с информационной моделью, на основе которой формирует образ реальной обстановки, производит анализ и оценку ситуации, принимает решения, осуществляет управляющие воздействия, наблюдает и оценивает результаты их реализации.

Информационная модель должна представлять лишь наиболее существенные свойства, связи, отношения. Модель должна быть наглядной, например давать наглядное представление о пространственном расположении объекта, о соотношении свойств. Она должна быть хорошо читаемой, легко воспринимаемой.

Информацию об объектах управления целесообразно предъявлять оператору в закодированном виде, но с исполь-

зованием такого алфавита символов, который легко понятен человеку и может быть без труда реализован в машине. Объём информации определяется условиями работы, но он не должен превышать возможности человека. Наиболее важную информацию следует выделять (линиями, мерцанием формуляров). Информацию, за которую оператор несёт ответственность, отображают ярко, осведомительную — приглушенно или в виде справочного табло.

Эргономические требования к техническим средствам деятельности

Эргономические требования к техническим средствам деятельности определяют конструкцию, организацию и компоновку рабочих мест — целостных единиц производства, в которых присутствуют три его основных элемента: предмет труда, средство труда и субъект труда. Конструктивные свойства технических средств должны быть согласованы с возможностями человека выполнять рабочие операции в нормальных и аварийных условиях. Этого можно достичь, если учитывать, кроме антропометрических, биомеханических, психофизиологических и других свойств работающего человека, также требования техники безопасности, соблюдать санитарно-гигиенические нормы и требования, а также требования технической эстетики.

Ниже приведено несколько примеров учёта эргономических требований в процессе проектирования технических средств деятельности оператора.

1. На вращающейся головке, расположенной сбоку аппарата, прибора, установки, можно развивать значительно большее усилие, чем на расположенной фронтально или горизонтально. Вращающаяся головка не должна быть слишком низкой (менее 5 мм), глубоко и остро профилированной. Рекомендуется чётное число (лучше всего 6) выемок для пальцев по окружности головки; трёх- или пятигранные звездобразные головки практически неудобны (рис. 52).

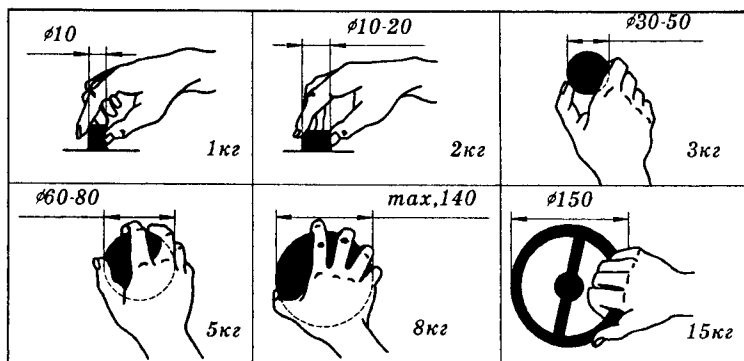


Рис. 52 Эргономические требования к маховичкам приборов

Величина маховичков (их диаметр) выбирается в зависимости от прилагаемого к ним необходимого усилия в соответствии с таблицей 7;

Таблица 7

Момент силы, Н · м (кгс)	10... 20	20... 30	30...40	40... 50
Диаметр маховичка, мм	150	250	350	400

2 — органы управления машиной (рис. 53, а), рукоятки инструментов (рис. 53, б) и т.д. должны иметь такую конфигурацию, которая, с одной стороны, не повреждала бы рук работающего, с другой — обеспечивала наибольшее удобство в работе.

У рукояток современных отвёрток, имеющих круглую в сечении форму и гладкую поверхность, как правило, нет опорных площадок. При работе с такими отвёртками можно повредить кожный покров ладони, к тому же при длительной работе устают мышцы руки. Физическая сила, затрачиваемая при работе с отвёрткой, распределяется между двумя одновременно выполняемыми действиями: давящим — по отношению к завинчиваемой детали; крутящим — в пределах предполагаемой оси.

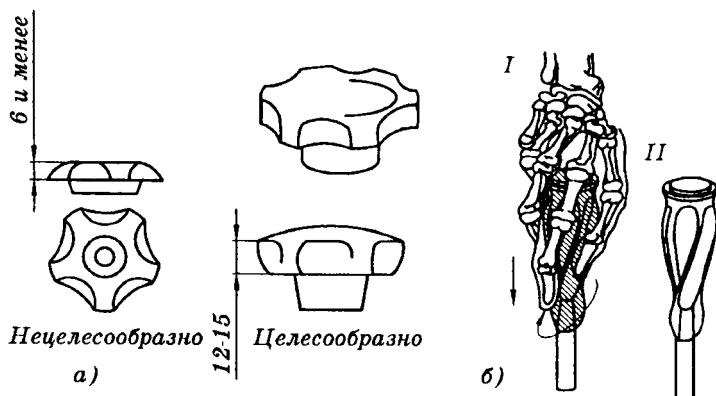


Рис. 53 Эргономические требования к органам управления (а) и рукояткам (б)

Анализ распределения физического усилия на пальцы и даже фаланги руки (рис. 53, I) позволил сконструировать рукоятку, обеспечивающую наибольшее удобство в работе. Поверхность такой рукоятки (рис. 53, II) разделена на три части, образующие подобие треугольной усеченной пирамиды, что создаёт хорошую опору для руки и равное распределение давления пальцами руки на поверхность рукоятки. Плавные переходы граней этой пирамиды создают впечатление равномерной округлости её формы;

3 — проектируемые машины и механизмы не должны создавать излишний шум во время работы, вызывать сотрясения и вибрации, выделять нежелательные продукты в виде пыли и газа сверх предусмотренных норм. Они должны быть простыми, удобными и безопасными в обслуживании;

4 — немалое влияние на повышение производительности труда и снижение производственного травматизма оказывает комплексное решение всей производственной среды, в которую входит предметное окружение в виде внешнего вида станка, инструмента, приспособления и др., спроектированных с учётом эстетических и психологических факторов. В этом случае снимается утомление, повышается вни-

мание к выполняемым рабочим операциям и создаётся приятная рабочая обстановка.

Общий показатель соответствия изделия требованиям технической эстетики можно в общем случае вывести, рассмотрев комплекс следующих показателей:

1. Показатели экономического и психологического воздействия на человека: удобство пользования отдельными изделиями и органами управления; целесообразность решения органов визуальной информации; удобство в обслуживании и эксплуатации; степень учёта физиологических и психологических требований при выборе формы и цвета изделия.

2. Композиционное и тектоническое совершенство изделия: соответствие формы изделия его назначению; соответствие формы изделия материалу и технологии; композиционное единство, целостность формы, пропорциональность, масштабность и выразительность частей; соответствие общего стиля формы и отделки окружающей среде и современным вкусам; соответствие декоративных элементов форме и функциональному назначению изделия.

3. Показатели товарного вида: качество поверхности (покрытия и обработка); выразительность фирменных и указательных знаков; сопроводительная документация, её рекламные и информационные качества; качество упаковки.

Контрольные вопросы к главе 5

1. Каким образом формируются рабочие поверхности деталей машин?

Какие поверхности называют конструктивными, технологическими?

2. Какая конструкция детали является технологичной?

3. Какие критерии технологичности чаще всего используют в машиностроении?

4. Перечислите виды технологичности и соответствующие им критерии оценки.

5. В чём проявляется технологичность как экономическая целесообразность?
6. Перечислите условия технологичности конструкции сборочного узла.
7. Как проявляется технологичность изделия в процессе ремонта и технического обслуживания?
8. Чем обусловлено использование эргономических критериев технологичности?
9. Перечислите основные виды эргономических требований к конструкции изделия.
10. Как реализуется технологичность конструкции при организации системы «человек — машина»?
11. Как реализуется эргономичность при организации деятельности оператора?
12. Приведите примеры реализации эргономических требований к средствам деятельности оператора системы «человек — машина».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Проектируя машину, конструкторы часто не задумываются о долговечности деталей, выбирая их форму, размеры и методы обработки по сложившимся в данной отрасли машиностроения традициям и нормативам, которые в современных условиях при непрерывном повышении напряжённости режимов нуждаются в пересмотре. В большинстве случаев достаточно применить общие приёмы рационального конструирования для того, чтобы ещё на стадии проектирования решить многие проблемы долговечности.

Подобно тому, как в авиации все детали во время проектирования тщательно проверяют на массу, так в общем машиностроении следовало бы осуществлять систематический контроль и экспериментальную проверку проектируемых узлов и деталей на долговечность.

Есть, однако, исключения. Очень трудно обеспечить долговечность деталей, работающих в непосредственном соприкосновении с абразивной средой (крыльчатки насосов, перекачивающих загрязнённые жидкости, рабочие органы почвообрабатывающих машин, зубья ковшей экскаваторов, траки гусеничных машин, цепи и приводы непрерывного транспорта для цемента, угля и др.). Срок службы таких деталей составляет в некоторых случаях (буровые коронки) десятки часов; его можно только удлинить путём подбора наиболее износостойких материалов и применением рациональной упрочняющей обработки.

Во многих руководствах по машиностроению рекомендуют применять дешёвые материалы и простые способы изготовления, допускаемые по функциональному назначению детали. Эти рекомендации нельзя принять без оговорок. Вопрос о выборе материалов и методов изготовле-

ния следует решать только на основании сопоставления относительной роли дополнительных производственных расходов к общей сумме расходов за период эксплуатации машины.

Ничтожные в общем балансе дополнительные расходы на повышение долговечности дают в конечном счёте огромный выигрыш в результате увеличения полезной суммарной отдачи машины, уменьшения простоев и стоимости ремонтов. Отсюда вытекает важный практический вывод: стремясь, как правило, к удешевлению машины, не надо жалеть затрат на изготовление деталей, определяющих надёжность машин. Не следует скупиться и на исследовательские работы по изысканию новых материалов и технологических приёмов, повышающих долговечность.

Инженерный опыт создания сложных технических систем позволяет сформулировать основные правила повышения надёжности, которых надо придерживаться на различных этапах создания изделия.

Проектирование

1. Система должна содержать максимально возможное число элементов, проверенных на практике. Число «новых событий» в системе должно быть ограниченным.

2. Рекомендуются применение «модульного принципа» конструирования (система создаётся из отдельных автономных узлов), широкое использование стандартных и унифицированных деталей и узлов.

3. Система должна содержать защитные устройства, предусматривающие устранение возможности возникновения катастрофических отказов (ограничение возрастания оборотов, температуры, давления, крутящего момента и т.п.); сигнальные устройства, предупреждающие о нарушении нормальной работы (световые сигналы и т.п.).

4. Система должна обладать высокой контролеспособностью (оснащена контрольной аппаратурой для оценки виб-

раций, температур; должна быть доступность визуальных осмотров, контроля фильтров, зазоров и т.п.).

5. Система должна быть удобной для ремонта, допускать простую замену быстроизнашивающихся деталей, отдельных элементов и узлов без разборки и переналадки всего изделия.

6. Нагруженные элементы системы должны подвергаться тщательному расчёту на статическую и динамическую прочность, а также на надёжность. При таком расчёте должны быть учтены рассеяние нагрузок, наиболее неблагоприятные рабочие условия (температура, воздействие среды и т.п.), минимальная прочность материала и др.

7. Для определённого типа систем (изделий) должны быть установлены нормы прочности, регламентирующие допустимые запасы прочности и необходимый объём экспериментальных исследований. Запасы прочности должны учитывать рассеяние механических свойств материала.

Опытное производство и испытания

1. Опытные экземпляры изделий должны быть предназначены для всесторонних исследований и испытаний в лабораторных, стендовых и эксплуатационных условиях. При исследовании измеряют параметры рабочего процесса (давление, температуру), тензометрированием определяют действующие переменные напряжения и т.д. Целесообразно проводить опережающие исследования и испытания отдельных элементов (узлов) системы для скорейшего выявления и устранения дефектов.

2. Должны проводиться определения конструкционной прочности, износостойкости, коррозионной и эрозионной прочности отдельных элементов системы (деталей и узлов).

Исследования осуществляют на образцах-имитаторах и натуральных деталях. Во многих случаях оказывается необходимым создание специальных испытательных стендов для исследования надёжности элементов и узлов.

3. Опытные экземпляры испытывают на надежность в условиях, имитирующих эксплуатационные. Для более быстрого выявления «слабых мест» и потенциальных возможностей изделия проводят ускоренные эквивалентные и форсированные испытания.

4. Следует проводить специальные испытания, выясняющие работоспособность системы при особых условиях эксплуатации, транспортирования, хранения и т.п. (климатические испытания, испытания на перегрузки, на непробиваемость корпуса и т.п.).

При использовании материала нового типа, ранее не применявшегося в подобных изделиях, принципиально новых конструктивных решений, схем, условий работы необходимо увеличивать объём испытаний.

5. Для более полного выявления или подтверждения достаточной надёжности систем проводят испытания опытной партии в условиях эксплуатации (для изделий, рассчитанных на серийное изготовление).

6. В процессе опытного производства в конструкцию и технологию должны вноситься изменения, направленные на устранение выявленных отказов и неисправностей. Стадия опытного производства завершается официальными испытаниями и утверждением эталона для серийного производства.

СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

1. Технологические процессы серийного производства должны обеспечивать качество изделий (конструкционную прочность и др.) не ниже качества изделий опытного производства.

2. При изготовлении деталей, особенно ответственных, нельзя допускать концентрацию напряжений (недостаточные радиусы закруглений, отсутствие фасок и т.д.).

3. Технологические процессы не должны создавать значительные остаточные напряжения, понижающие прочность изделий. Следует устранять причины, порождающие

возможность технологических повреждений (прижогов, перегревов, трещин и др.).

4. Для ответственных деталей необходимо применять упрочняющую технологию (виброгалтовку, обдувку дробью, поверхностный наклёп), должны использоваться защитные покрытия, предохраняющие деталь от коррозии и других вредных воздействий.

5. Следует установить систему входного контроля (для материалов, поступающих в серийное производство, комплектующих деталей, узлов, агрегатов). Для контроля в процессе производства детали и узлы разбивают на различные группы контроля в зависимости от назначения и ответственности. Условия контроля указывают в чертеже детали. Для ответственных деталей следует применять контроль геометрии, механических свойств, твёрдости, структуры материала, химического состава и др. Для выявления дефектов (трещин, рыхлот, засорений и т.п.), особенно в литых деталях, сварных швах, поковках, необходимо применять дефектоскопию (цветную, люминесцентную и др.), рентгеноскопический анализ, ультразвуковой контроль. Рекомендуется применять разрезку одной детали из партии для проведения более полного исследования; использовать микрообразцы, вырезаемые из деталей для проверки механических свойств. В отдельных случаях целесообразно применять образцы-свидетели, проходящие вместе с основной деталью определённую технологическую операцию (например термообработку, литьё и т.п.).

Для новых материалов или при изменении поставщиков входной контроль должен быть усилен дополнительными исследованиями (для подтверждения уровня рассеяния свойств, для выявления чувствительности материала к перегрузкам и т.п.).

6. Условия контроля должны быть более жёсткими в начальной стадии производства. При достижении необходимого уровня качества производства и его стабильности обычно имеется возможность упростить контроль (после

соответствующего согласования). Должны быть предусмотрены испытания, подтверждающие стабильность технологического процесса, допустимый уровень рассеяния количественных показателей, физических и других свойств, влияющих на надёжность (периодическое определение остаточных напряжений, пределов выносливости и т.п.).

7. Изменения, вносимые в технологию изготовления и сборки ответственных деталей, в том числе в размеры заготовок, поковок, изменения припусков посадок и допусков и т.п., должны быть согласованы с конструктором и в большинстве случаев проверены при лабораторных, стендовых или других испытаниях.

Особо тщательная экспериментальная проверка должна быть при внесении изменений в конструкцию деталей и узлов. Часто подобные изменения «усовершенствования», «очевидные улучшения», введённые без надлежащей проверки, являются причиной появления отказов и разрушений.

Эксплуатация и ремонт

1. Эксплуатация сложных технических систем должна соответствовать техническим условиям и специальным руководствам. При необходимости должны быть указаны допустимые условия по температуре, влажности, загрязнённости окружающей среды, продолжительности тяжёлых режимов, регламентации переходных процессов и др.

2. Для сложных ответственных изделий должна быть разработана система технической диагностики, осуществляющая сбор, хранение и анализ информации о состоянии изделия. Информация должна непрерывно поступать от датчиков, регистрирующих частоту вращения, температуру, давление, вибрации и т.п. Система технической диагностики должна включать сигнализаторы состояния узлов, наличия стружки в масле, опасного уровня температур и вибраций и т.п. Система должна включать тесты для поиска и локализации неисправностей.

3. Система обслуживания должна содержать регламентные работы, профилактические осмотры и ремонты. Техническое обслуживание может включать принудительную замену отдельных деталей и узлов после определённой наработки или календарного времени.

4. В пределах общего срока службы изделия могут быть предусмотрены промежуточные ремонты, сроки которых определяются соображениями надёжности и экономической целесообразности. Надёжность отремонтированных изделий должна подтверждаться специальными испытаниями.

5. Должны проводиться исследования конструкционной прочности деталей и узлов с эксплуатационными повреждениями (коррозия, эрозия, забоины, изнашивание и др.), позволяющие определить степень деградации свойств.

На основании таких исследований и опыта эксплуатации устанавливаются нормы и эталоны на допустимые повреждения рабочих поверхностей деталей машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровская, Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст] : учеб. / Л.Н. Александровская [и др.]. — М.: Логос, 2003.
2. Алисин, В.В. Трение, изнашивание и смазка [Текст] : справочник: в 2 кн. / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев [и др.] / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1.; 1979. — Кн. 2.
3. Бахарев, В.П. Основы триботехники [Текст] : учебно-метод. пособие по курсу «Триботехника» / В.П. Бахарев. — М., 1994.
4. Биргер, И.А. Расчёт на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр [и др.]. — М.: Машиностроение, 1993.
5. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) [Текст] : учебник / Д.Н. Гаркунов. — М.: Издательство МСХА, 2002.
6. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин [Текст] : учеб. пособие для техн. спец. вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. — М.: Высш. шк., 2001.
7. Единая система допусков и посадок в машиностроении и приборостроении [Текст] : справочник : в 2 т. — М.: Изд-во стандартов, 1971.
8. Когаев, В.П. Прочность и износостойкость деталей машин [Текст] : учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. — М.: Высш. шк., 1991.
9. Конструирование машин [Текст] : справочно-методическое пособие: в 2 т. / под ред. акад. К.В. Фролова. — М.: Машиностроение, 1994. — Т. 1,2.
10. Крагельский, И.В. Узлы трения машин [Текст] : справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. — М.: Машиностроение, 1984.
11. Курсовое проектирование грузоподъёмных машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / под ред. С.А. Казака. — М.: Высш. шк., 1989.
12. Моисеева, Н.К. Функционально-стоимостной анализ в машиностроении [Текст] / Н.К. Моисеева. — М.: Машиностроение, 1987.
13. Метрологическое обеспечение в машиностроении [Текст] / Н.Н. Марков. — М.: Станкин, 2005.
14. Орлов, П.И. Основы конструирования [Текст] : справочно-методическое пособие / П.И. Орлов: в 2 кн. / под ред. П.Н. Учаева. — М.: Машиностроение, 1988.

15. Радкевич, Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] : учеб. для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. — М.: Высш. шк., 2004.

16. Радкевич, Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] : учеб. для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. — М.: Высш. шк., 2006.

17. Радкевич, Я.М., Стандартизация [Текст] : учеб. пособие для вузов / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов [и др.]. — М.: Славянская школа, 2005.

18. Решетов, Д.Н. Работоспособность и надёжность деталей машин [Текст] : учеб. пособие для вузов / Д.Н. Решетов. — М.: Высш. шк., 1974.

19. Ройтман, И.А. Основы машиностроения в черчении [Текст] : учеб. для вузов / И.А. Ройтман, В.И. Кузьменко: в 2 кн. — М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2000.

20. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация [Текст] : учеб. пособие / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.Б. Терегря. — М: Логос, 2005.

21. Сердобинцев, Ю.П. Моделирование и исследование сопряжений технологического оборудования [Текст] : монография / Ю.П. Сердобинцев, А.Г. Схиртладзе. — М.: Сатурн-С, 2005.

22. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства: справочник / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989.

23. Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе: в 3 т. — М.: Машиностроение, 1989.

24. Схиртладзе, А.Г. Оборудование машиностроительных производств [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Г. Схиртладзе, Т.К. Иванова, А.Б. Тарасов [и др.]. — М.: Глобус, 2006.

25. Схиртладзе, А.Г. Проектирование нестандартного оборудования [Текст] : учеб. для вузов / А.Г. Схиртладзе, С.Г. Ярушин. — М.: ООО «Новое знание», 2006.

26. Схиртладзе, А.Г., Технологическое оборудование машиностроительных производств [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков. — М.: Высш. шк., 2002.

27. Схиртладзе, А.Г., Технологические регламенты процессов металлообработки и сборки в машиностроении [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Г. Схиртладзе, В.П. Борискин, А.И. Пульбере [и др.]. — Старый Оскол: ООО ТНТ, 2005.

28. Ярушин, С.Г. Проектирование нестандартного оборудования [Текст] : учебник / С.Г. Ярушин, А.Г. Схиртладзе. — Пермь. / Перм. гос. техн. ун-т. 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ. ПОНЯТИЕ О ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН.....	5
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН .	19
1.1 Формирование задач и общие принципы проектирования ..	19
1.2 Проектирование машин на базе унификации	29
1.3 Метод универсализации и последовательного развития машин. Универсализация машин.	41
1.4 Надёжность и долговечность машин	44
1.5 Эксплуатационная надёжность машин	53
<i>Контрольные вопросы к главе 1</i>	<i>61</i>
ГЛАВА 2. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ	62
2.1 Основные понятия в области стандартизации	62
2.2 Система государственных стандартов России. Международная система стандартизации	67
2.3 Основы комплексной стандартизации. Агрегатирование ..	76
2.4 Взаимозаменяемость и точность	88
2.5 Общие сведения о размерах, проставляемых на чертежах деталей	92
2.6 Система допусков и посадок. Определение и обозначение посадок	97
2.7 Схематическое графическое изображение полей допусков ..	101
2.8 Влияние погрешностей обработки резанием на точность формы и расположения поверхностей деталей (макрогеометрия)	105
2.9 Шероховатость (микрогеометрия) поверхности машиностроительных деталей	112
2.10 Выбор шероховатости для поверхностей деталей	118
<i>Контрольные вопросы к главе 2</i>	<i>120</i>
ГЛАВА 3. РАСЧЁТЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ УЗЛОВ И МАШИН	121
3.1 Надёжность техники на современном этапе	121
3.2 Основные понятия и показатели надёжности	126

3.3 Основное уравнение теории надёжности	131
3.4 Надёжность системы элементов	137
3.5 Количественные показатели надёжности восстанавливаемых изделий	145
3.6 Теория долговечности в структуре теории надёжности ..	150
3.7 Надёжность в конструкторских расчётах на прочность .	161
3.8 Методы повышения надёжности и долговечности узлов трения	171
<i>Контрольные вопросы к главе 3</i>	178

ГЛАВА 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАШИН	180
4.1 Показатели экономичности конструкции машины	180
4.2 Влияние долговечности на экономичность и численность машинного парка	188
4.3 Удельные единовременные затраты на создание и освоение новой техники (СОНТ) и капиталовложения в производство КП	194
4.4 Применение функционально-стоимостного анализа при проектировании (ФСА–АНАЛИЗ)	200
<i>Контрольные вопросы к главе 4</i>	206

ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ (КД)	208
5.1 Общие сведения	208
5.2 Отработка конструкций изделий на технологичность ...	210
5.3 Технологичность и конструктивная форма детали	216
5.4 Технологичность сборочных соединений и ремонтная технологичность	220
5.5 Технологичность и эргономика	224
<i>Контрольные вопросы к главе 5</i>	235

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА	237
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	244

Учебное издание

БАХАРЕВ Вениамин Павлович
КУЛИКОВ Михаил Юрьевич
БОРТНИКОВ Иван Иванович
СХИРТЛАДЗЕ Александр Георгиевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях

Часть 1

Общие методы проектирования и расчёта.
Надёжность техники

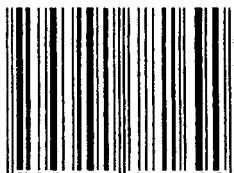
Под редакцией профессора А.Г. Схиртладзе

Редактор *Попова Л.В.*
Технический редактор *Макаров А.В.*
Компьютерная верстка *Ефремовой М.В.*
Компьютерная графика *Борискиной А.В.*

Подписано в печать 05.08.08.
Формат 60х84/16. Бумага писчая
Гарнитура School Book STT. Усл. печ. л. 14,42
Тираж 300 экз. Заказ № 172

Издательство «Тонкие Научноёмкие Технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородская обл.,
м-н Макаренко, д. 40.
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39
Отпечатано в типографии
ООО «Тонкие Научноёмкие Технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородская обл.,
м-н Макаренко, д. 40.
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39

ISBN 978-5-94178-169-0



9 785941 781690