А. А. Чунихин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ОБЩИЙ КУРС

3-е издание,
переработанное и дополненное

Допущено Государственным комитетом СССР по народному образованию в качестве учебника для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов

Москва
Энергоатомиздат
1988

ББК 31.264
Ч-91
УДК [621.316.37+621.316.9](075.8)

Рецензент кафедра электрических аппаратов
Ленинградского политехнического института

Чунихин А. А.

Ч-91 Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 720 с.: ил.

ISBN 5-283-00499-6

Рассматриваются основы теории электрических аппаратов, описаны устройство и принцип работы аппаратов распределительных устройств высокого и низкого напряжения и аппаратов автоматики, а также конструкции узлов аппаратов, режимы их работы и эксплуатационные характеристики. Даны рекомендации по выбору электрических аппаратов. Второе издание вышло в 1975 г.

Для студентов электротехнических и энергетических вузов и факультетов.

Ч $\frac{2302030000\text{-}485}{051(01)\text{-}88}$ 143-88 ББК 31.264

ISBN 5-283-00499-6

© Энергоатомиздат, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник представляет собой дополненное и переработанное издание книги, вышедшей в 1975 г. Он широко использовался для специальностей: электрические машины, электрооборудование самолетов и автомобилей, электротехнические материалы и кабели, автоматизированный электропривод и др. В 1976 г. книга удостоена серебряной медали ВДНХ СССР и получила одобрение ведущих политехнических вузов страны.

Настоящее издание написано в соответствии с программами общего курса «Электрические аппараты» для вышеуказанных специальностей с учетом замечаний специалистов Ленинградского, Томского, Киевского, Харьковского политехнических институтов, Ивановского энергетического института, а также Всесоюзного заочного политехнического института.

По сравнению с предыдущим в настоящее издание внесены некоторые изменения. В I части переработана гл. 4, в которой рассмотрены способы гашения электрической дуги и бездуговое отключение электрической цепи с помощью полупроводниковых приборов. Во II и III частях описаны современные электрические аппараты, выпускаемые промышленностью. Особое внимание уделено физическим процессам, происходящим в аппаратах, их устройству, регулировочным характеристикам и выбору. Заново написаны гл. 11 и 12, посвященные герконам и полупроводниковым электрическим аппаратам.

Рассмотрено также воздействие механических и климатических факторов на электрические аппараты в условиях эксплуатации.

Во всех главах более глубоко освещены вопросы эксплуатации и выбора электрических аппаратов.

Автор считает своим долгом выразить благодарность

сотрудникам кафедры электрических аппаратов МЭИ за предложения по улучшению третьего издания книги и коллективу кафедры электрических аппаратов Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина и ее заведующему доктору техн. наук, проф. Г. Н. Александрову за большой труд по рецензированию книги и ценные замечания, которые учтены при доработке рукописи.

Автор выражает глубокую благодарность редактору книги инж. И. Д. Беликову за проделанную им большую работу по редактированию и ряд ценных замечаний, способствующих улучшению содержания книги.

Все замечания и пожелания по книге автор просит присылать по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электрический аппарат — это электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

Под электрическими аппаратами понимается широкий круг всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

В настоящей книге рассматриваются основы теории, конструкция и эксплуатационные характеристики аппаратов, которые применяются в электрических системах, схемах электроснабжения промышленных предприятий и при автоматизации производственных процессов и электропривода.

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков: назначению (основной выполняемой функции), области применения, принципу действия, роду тока, исполнению защиты от воздействий окружающей среды, конструктивным особенностям и др. Основной является классификация по назначению, которая предусматривает разделение электрических аппаратов на следующие большие группы.

1. Коммутационные аппараты распределительных устройств, служащие для включения и отключения электрических цепей. К этой группе относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели, предохранители. Для аппаратов этой группы характерно относительно редкое их включение и отключение. Могут быть и случаи, когда такие аппараты довольно часто включаются и отключаются (например, выключатели высокого напряжения в цепях питания электрических печей).

2. Ограничивающие аппараты, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшим нагрузкам.

3. Пускорегулирующие аппараты, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или каких-либо других потребителей электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы и реостаты. Для аппаратов этой группы характерны частые включения и отключения, число которых достигает 3600 в час и более.

4. Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики. Для реле характерно плавное изменение входной (контролируемой) величины, вызывающее скачкообразное изменение выходного сигнала. Выходной сигнал обычно воздействует на схему автоматики. В датчиках непрерывное изменение входной величины преобразуется в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Это изменение выходной величины может быть как плавным (измерительные датчики), так и скачкообразным (реле-датчики). С помощью датчиков могут контролироваться как электрические, так и неэлектрические величины.

5. Аппараты для измерений. С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает стандартное значение, удобное для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.

6. Электрические регуляторы. Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону. В частности, такие аппараты служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин. В данном курсе электрические регуляторы не рассматриваются, так как принцип их действия и характеристики связаны с теорией автоматического регулирования, которая в настоящей книге не излагается.

Разделение аппаратов по областям применения более условно. Аппараты для электрических систем и электроснабжения объединяют в группу аппаратов распределительных устройств низкого и высокого напряжения. Аппараты, применяющиеся в схемах автоматического управления электроприводами и для автоматизации производственных процессов, удобно объединить в группу аппаратов управления. Одни и те же аппараты могут быть отнесены как к группе аппаратов распределительных устройств, так и к группе аппаратов управления, например рубильники, пакетные выключатели, контакторы, трансформаторы тока, реле и др. Классификация электрических аппаратов по области применения принята в настоящей книге.

По номинальному напряжению электрические аппараты разделяются на две группы: аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000 В).

Защитные оболочки электрических аппаратов. Для предотвращения соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими или подвижными частями и исключения попадания в аппараты инородных тел устанавливаются специальные защитные оболочки. Согласно ГОСТ 14254—80 защитные свойства оболочки обозначаются буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала к опасным деталям аппарата, вторая характеризует защиту от попадания внутрь аппарата инородных предметов и жидкостей. Ниже приводятся защитные свойства некоторых исполнений по ГОСТ 14254—80.

IP00. Открытое исполнение. Защита персонала от соприкосновения с токоведущими или подвижными частями отсутствует. Инородные тела могут попадать внутрь аппарата.

IP20. Защищенное исполнение. Оболочка таких аппаратов предохраняет от случайного прикосновения к токоведущим или подвижным частям или от проникновения внутрь аппарата посторонних предметов. Оболочка должна препятствовать соприкосновению с деталями аппарата металлического щупа (диаметр 12, длина 80 мм), шарик диаметром 12 мм не должен проникать внутрь аппарата.

IP22. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от вредного воздействия капель жидкости, падающих на стенку оболочки, наклоненную к вертикали под углом в пределах 15°.

IP23. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от дождя, падающего под углом 60° к вертикали.

IP40. Оболочка защищает аппарат от попадания внутрь него мелких предметов диаметром более 1 мм.

IP42. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от воздействия капель жидкости (так же как IP22).

IP44. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от воздействия брызг жидкости, падающих под любым углом.

IP50. Оболочка аппарата защищает от вредного воздействия пыли (допускается попадание внутрь небольшого количества пыли, не нарушающего нормальной работы аппарата).

IP60. Пылезащищенное исполнение. Оболочка полностью препятствует попаданию пыли.

IP65. Пылеводозащищенное исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка защищает от воздействия струи воды, направленной под любым углом к ее поверхности.

IP66. Пылеводонепроницаемое исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка обеспечивает полную защиту от попа-

дания воды внутрь аппарата при воздействии струи под любым углом к поверхности (морское исполнение).

IP67. Герметичное исполнение. В дополнение к свойствам исполнений IP60 оболочка обеспечивает полную герметичность аппарата.

Воздействия механических и климатических факторов на электрические аппараты в условиях эксплуатации регламентируются действующими стандартами (ГОСТ 15150—69 и 15543—70). Под климатическими факторами внешней среды понимаются температура и влажность окружающего аппарат воздуха, давление воздуха (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль (в том числе и снежная), солевой туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибков, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов. Нормальные значения климатических факторов внешней среды, принятые для использования в технике, соответствуют данной географической зоне с учетом места размещения аппарата. В технической документации на электрический аппарат всегда оговариваются значения климатических факторов, в пределах которых обеспечивается нормальная эксплуатация изделий. Эти значения принято называть номинальными. Различают также рабочие и предельные значения факторов. Значения климатических факторов, при которых обеспечивается сохранение номинальных параметров и гарантированный срок службы аппаратов, называются рабочими. Значения климатических факторов: а) при которых сохраняется работоспособность аппарата при допустимых отклонениях точности и номинальных параметров, б) после прекращения действия которых точность и номинальные параметры аппарата восстанавливаются, принято называть предельными рабочими.

С точки зрения воздействия климатических факторов поверхность земного шара делится на ряд макроклиматических районов. Каждый макроклиматический район характеризуется однородностью географических факторов и количественных показателей климатических факторов на своей территории.

В табл. В.1 приведены климатические исполнения электрических аппаратов, предназначенных для эксплуатации на суше, озерах и реках. Исполнения для морского климата даны в [3.1]. В зависимости от места размещения в условиях эксплуатации электрические аппараты делятся на категории, указанные в табл. В.2. Следует отметить, что на работу аппаратов оказывает влияние также атмосферное давление. От плотности атмосферного воздуха зависят прочность внешней электрической изоляции и охлаждение электрических аппаратов. Большинство электрических аппаратов изготовляют для работы на нормальной высоте 1000 м над уровнем моря, при которой аппараты работают с номинальными параметрами. Однако аппараты могут работать на высотах, превышающих нормальную.

При этом в соответствующих стандартах или технических усло-

Таблица В.1

Исполнение для макроклиматических районов	Обозначения		
	буквенное		цифровые
	русские	латинские	
С умеренным климатом	У	(N)	0
С умеренным и холодным климатом	УХЛ	(NF)	1
С влажным тропическим климатом	ТВ	(TH)	2
С сухим тропическим климатом	ТС	(TA)	3
С сухим и влажным тропическим климатом	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов на суше, кроме района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О	(U)	5

Таблица В.2

Категории размещения для эксплуатации	Обозначение
На открытом воздухе	1
Под навесом или в помещениях (объемах), где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от их колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха	2
В закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе	3
В помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями	4
В помещениях (объемах) с повышенной влажностью (например, в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в том числе шахтах, подвалах, в почве и др.)	5

виях указывается уменьшение номинальной нагрузки на каждые 100 или 1000 м высоты, превышающей нормальную. Аналогично учитывается уменьшение электрической прочности воздушных промежутков. Электрические аппараты для самолетов и других летательных аппаратов работают при пониженном давлении на высоте значительно выше 1000 м, которое регламентировано в пределах $70—1{,}3 \cdot 10^{-4}$ кПа.

В зависимости от содержания коррозионно-активных агентов окружающая атмосфера делится на четыре типа в соответствии с табл. В.3.

При заказе аппарата необходимо указывать его исполнение (табл. В.1), категорию размещения (табл. В.2) и предельную высоту места

Таблица В.3

Тип атмосферы		Содержание коррозионно-активных агентов
Обозначение	Наименование	
I	Условно чистая	Сернистый газ — не более 20 мг/(м²·сут), не более 0,025 мг/м³; хлориды — менее 1 мг/(м²·сут)
II	Промышленная	Сернистый газ — от 20 до 110 мг/(м²·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м³; хлориды — менее 0,3 мг/(м²·сут)
III	Морская	Сернистый газ — не более 20 мг/(м²·сут), не более 0,025 мг/м³; хлориды — от 30 до 300 мг/(м²·сут)
IV	Приморско-промышленная	Сернистый газ — от 20 до 110 мг/(м²·сут), от 0,025 до 0,13 мг/м³; хлориды — от 0,3 до 30 мг/(м²·сут)

установки аппарата над уровнем моря. Климатическое исполнение и категория размещения указываются в конце сокращенного обозначения электрических аппаратов. Так, например, обозначение ВЭ-10-1250-20-У3 означает выключатель электромагнитный на номинальное напряжение 10 кВ, номинальный ток 1250 А, номинальный ток отключения 20 кА, для умеренного климата (У), и для эксплуатации в закрытых помещениях (категория размещения 3). Предприятия, разрабатывающие и изготавливающие электрические аппараты, руководствуются стандартами, предусматривающими нормы механических испытаний (на удары, вибрацию, механические нагрузки на выводы аппарата), акустических испытаний, климатических испытаний (теплостойкость, холодостойкость, грибоустойчивость, водонепроницаемость, брызгозащищенность, солнечная радиация и др.).

Требования к электрическим аппаратам весьма разнообразны и зависят от назначения, условий эксплуатации, необходимой надежности и т. д. Однако можно сформулировать требования, которые являются общими для всех электрических аппаратов.

1. При номинальном режиме работы температура токоведущих элементов аппарата не должна превосходить значений, рекомендуемых соответствующим ГОСТ или другим нормативным документом.

При коротком замыкании (КЗ) токоведущие элементы аппарата подвергаются значительным термическим и динамическим нагрузкам, вызываемым большим током. Эти нагрузки не должны вызывать остаточных явлений, нару-

шающих работоспособность аппарата после устранения КЗ.

2. Аппараты, предназначенные для частого включения и отключения, должны иметь высокую износостойкость.

3. Контакты аппаратов, предназначенных для отключений токов КЗ, должны быть рассчитаны на этот режим.

4. Изоляция электрических аппаратов должна выдерживать перенапряжения, которые имеют место в эксплуатации, и обладать определенным запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции с течением времени и вследствие осаждения пыли, грязи и влаги.

5. К каждому аппарату предъявляется ряд специфических требований, обусловленных его назначением. Так, например, выключатель высокого напряжения должен отключать ток КЗ за малое время (0,04—0,06 с). Трансформатор тока должен давать токовую и угловую погрешности, не превышающие определенного значения.

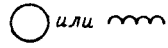
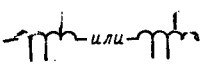
6. В связи с широкой автоматизацией производственных процессов, применением сложных схем автоматики увеличивается число аппаратов, участвующих в работе. Возможность отказа в работе электрических аппаратов требует их резервирования и создания специальной системы поиска неисправностей. В связи с этим электрические аппараты должны обладать высокой надежностью. Выход из строя аппаратов высокого напряжения приводит к большим разрушениям и материальным потерям.

7. Масса, габаритные размеры, стоимость и время, необходимые для установки и обслуживания электрических аппаратов, должны быть минимальными. Отвечающие современным требованиям электрические аппараты за срок службы 25 лет не должны нуждаться в ремонте и сложной ревизии. Конструкция электрических аппаратов должна обеспечивать возможность автоматизации в процессе их изготовления и эксплуатации.

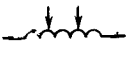
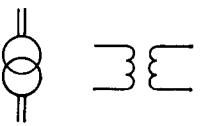
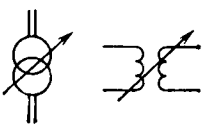
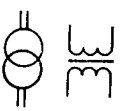
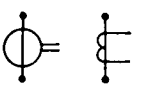
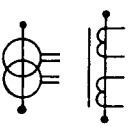
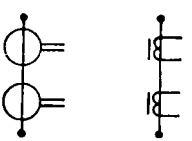
Для большинства электрических аппаратов характерны физические явления, выражающиеся в возникновении электродинамических усилий между токоведущими частями, в нагреве этих частей до высоких температур и в существовании электрической дуги между контактами при разрыве электрической цепи. Такие явления описаны в первой части книги. В этой же части рассматриваются электромагниты, используемые для управления большинством электрических аппаратов различных типов и назначения.

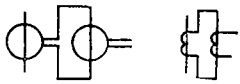
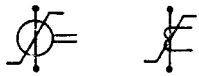
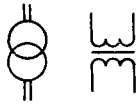
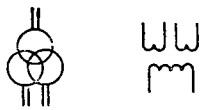
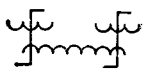
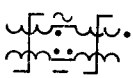
Для удобства чтения схем приведены условные графические обозначения аппаратов и их элементов (табл. В.4).

Таблица В.4. **Обозначения электрических аппаратов и их элементов в электрических схемах**

Наименование	Обозначение
Обозначения элементов катушек индуктивностей, дросселей, трансформаторов, автотрансформаторов и магнитных усилителей	
Обмотка трансформатора, автотрансформатора, дросселя и магнитного усилителя	
Примечания: 1. Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливаются	
2. При изображении магнитных усилителей разнесенным способом используют следующие обозначения: а) рабочая обмотка	
б) управляющая обмотка	
3. Для указания начала обмотки используют точку	
Магнитопровод: а) ферромагнитный	
б) ферромагнитный с воздушным зазором	
в) магнитодиэлектрический	
Характер кривой намагничивания отражают при помощи следующих знаков: а) прямоугольная петля гистерезиса	
б) непрямоугольная петля гистерезиса	
Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители	
Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода	
Реактор	
Катушка индуктивности с отводами	

Продолжение табл. В.4

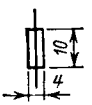
Наименование	Обозначение
Катушка индуктивности (обмотка автотрансформатора) со скользящими контактами	
Катушка индуктивности с магнитодиэлектрическим магнитопроводом	
Катушка индуктивности, реактор, дроссель с магнитопроводом	
Трансформатор без магнитопровода:	
а) с постоянной связью между обмотками	
б) с переменной связью между обмотками	
Трансформатор однофазный с магнитопроводом	
Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой	
Трансформатор тока с одним магнитопроводом и двумя вторичными обмотками	
Трансформатор тока с двумя магнитопроводами и двумя вторичными обмотками	
Примечание. При наличии нескольких магнитопроводов допускается магнитопроводы не изображать	

Наименование	Обозначение
Трансформаторы тока в каскадном соединении	
Трансформатор тока быстронасыщающийся	
Трансформатор напряжения измерительный	
Трансформатор напряжения измерительный с двумя вторичными обмотками	
Усилитель магнитный с двумя рабочими и общей управляющей обмотками	
Усилитель магнитный с двумя последовательно соединенными рабочими обмотками и двумя встречно включенными секциями управляющей обмотки	
Элемент ферромагнитный, трансформатор запоминающий, элемент памяти	

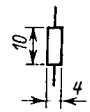
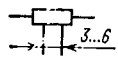
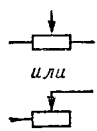
Разрядники. Предохранители (ГОСТ 2.727—68)

Разрядник. Общее обозначение	

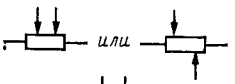
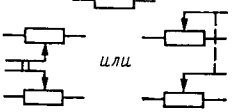
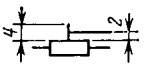
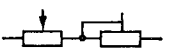
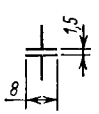
Продолжение табл. В.4

Наименование	Обозначение
Примечание. Если необходимо уточнить тип разрядника, то применяют следующие обозначения:	
а) разрядник трубчатый	
б) разрядник вентильный и магнитовентильный	
в) разрядник шаровой	
г) разрядник роговой	
Предохранитель плавкий. Общее обозначение	
Предохранитель инерционно-плавкий	
Предохранитель быстродействующий	
Предохранитель с сигнализирующим устройством с самостоятельной цепью сигнализации	
Выключатель-предохранитель	
Разъединитель-предохранитель	

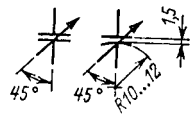
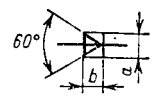
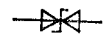
Продолжение табл. В.4

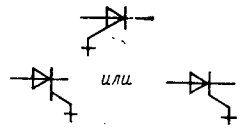
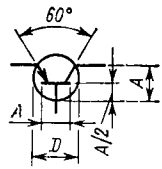
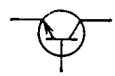
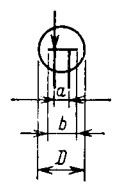
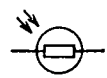
Наименование	Обозначение
Резисторы. Конденсаторы (ГОСТ 2.728—74)	
Резистор постоянный	
Резистор постоянный с дополнительными отводами:	
а) одним симметричным	
б) одним несимметричным	
в) с двумя	
Примечание. Если резистор имеет более двух дополнительных отводов, то допускается длинную сторону обозначения увеличивать, например резистор с шестью дополнительными отводами	
Шунт измерительный	
Резистор переменный	
Резистор переменный в реостатном включении:	
а) общее обозначение	
б) нелинейное регулирование	
Резистор переменный с дополнительными отводами	

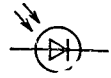
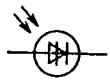
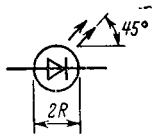
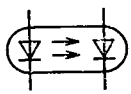
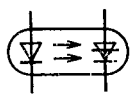
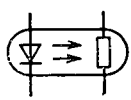
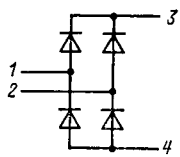
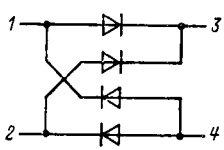
Продолжение табл. В.1

Наименование	Обозначение
Резистор переменный с несколькими подвижными контактами:	
а) механически не связанными	
б) механически связанными	
Резистор переменный сдвоенный	
Резистор подстроечный:	
а) общее обозначение	
б) в реостатном включении	
Резистор переменный с подстройкой	
Примечание. Приведенному изображению соответствует эквивалентная схема	
Тензорезистор:	
а) линейный	
б) нелинейный	
Элемент нагревательный	
Терморезистор:	
а) прямого подогрева	
б) косвенного подогрева	
Варистор	
Конденсатор постоянной емкости	

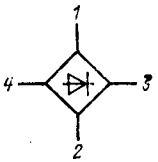
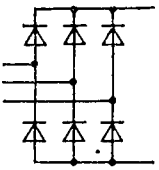
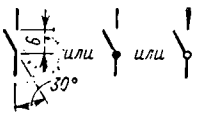
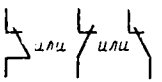
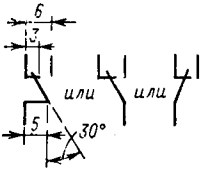
Продолжение табл. В.4

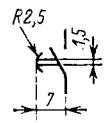
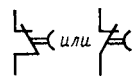
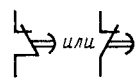
Наименование	Обозначение
Конденсатор переменной емкости	
Конденсатор электролитический	
Полупроводниковые приборы (ГОСТ 2.730—73)	
Диод. Общее обозначение a 5 6 b 4 5 d 1,5 2	
Туннельный диод	
Обращенный диод	
Стабилитрон: а) односторонний	
б) двусторонний	
Варикап	
Тиристор диодный (динистор)	
Тиристор диодный симметричный	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по катоду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом p-типа)	
Тиристор триодный незапираемый с управлением по аноду (тиристор с инжектирующим управляющим электродом n-типа)	

Наименование	Обозначение
Тиристор триодный запираемый с управлением по аноду Тиристор триодный запираемый с управлением по катоду	
Тиристор триодный симметричный незапираемый	
Примечание. Для упрощения допускается выполнять условные графические обозначения тиристоров в зеркальном изображении	
Транзистор типа *p-n-p* *D* 12 14 *A* 9 11 *a* 2,5 3,5	
Транзистор типа *n-p-n* с коллектором, электрически соединенным с корпусом	
Полевой транзистор с каналом *n*-типа *D* 12 14 *a* 2,5 3,5 *b* 3 4	
Полевой транзистор с каналом *p*-типа	
Фоторезистор	

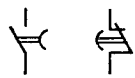
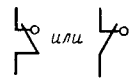
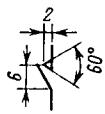
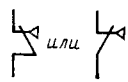
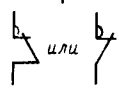
Наименование	Обозначение
Фотодиод	
Фототиристор диодный	
Фототранзистор типа *p-n-p*	
Светоизлучающий диод (R=5 или 6 мм)	
Диодная оптопара	
Тиристорная оптопара	
Резисторная оптопара	
Однофазная мостовая выпрямительная схема	
	или
а) развернутое изображение	

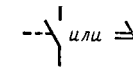
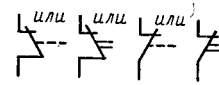
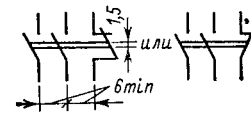
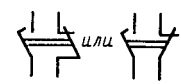
Продолжение табл. В.4

Наименование	Обозначение
б) упрощенное изображение	
Трехфазная мостовая выпрямительная схема	
Коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755—74)	
Коммутационные устройства на схемах должны изображаться в положении, принятом за начальное Контакт коммутационного устройства. Общее обозначение:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
в) переключающий	
г) переключающий без размыкания цепи	
д) переключающий со средним положением	

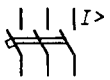
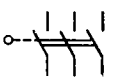
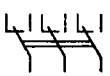
Наименование	Обозначение
е) с двойным замыканием	
ж) с двойным размыканием	
Контакт в контактной группе, срабатывающий раньше по отношению к другим контактам группы: а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт в контактной группе, срабатывающий позже по отношению к другим контактам группы: а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт замыкающий с замедлителем, действующим:	
а) при срабатывании	
б) при возврате	
в) при срабатывании и возврате	
Контакт размыкающий с замедлителем, действующим:	
а) при срабатывании	
б) при возврате	
в) при срабатывании и возврате	

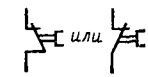
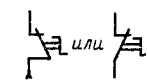
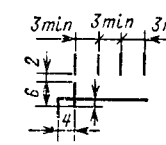
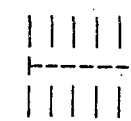
Продолжение табл. В.4

Наименование	Обозначение
Примечание. Обозначение замедлителя допускается изображать с противоположной стороны	
Контакт без самовозврата:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт с самовозвратом:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт для коммутации сильноточной цепи:	
а) замыкающий	
б) размыкающий	
в) замыкающий дугогасительный	
г) размыкающий дугогасительный	
Контакт разъединителя	
Контакт выключателя-разъединителя	
Контакт автоматического выключателя	

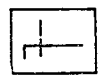
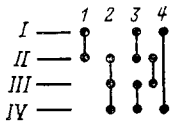
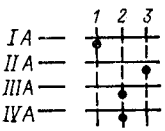
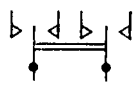
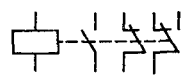
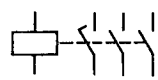
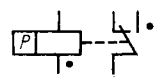
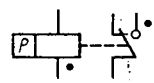
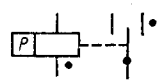
Наименование	Обозначение
Контакт с механической связью: а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт, чувствительный к температуре (термоконтакт): а) замыкающий	
б) размыкающий	
Контакт электротеплового реле при разнесенном способе изображения реле	
Выключатель трехполюсный	
Выключатель трехполюсный с двумя замыкающими и одним размыкающим контактами	
Выключатель двухполюсный, замыкающий одну цепь раньше размыкания другой	
Выключатель трехполюсный автоматический	

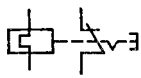
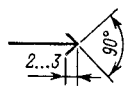
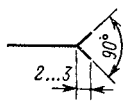
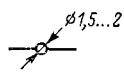
Продолжение табл. В.4

Наименование	Обозначение
Примечание. При необходимости указания величины, при изменении которой происходит срабатывание, используют следующие знаки:	
а) максимального тока	$I >$
б) минимального тока	$I <$
в) обратного тока	$I \leftarrow$
г) максимального напряжения	$U >$
д) минимального напряжения	$U <$
е) максимальной температуры	$T° >$
Знаки проставляют около обозначения выключателя, например: выключатель трехполюсный автоматический максимального тока	
Выключатель высокого напряжения	
Отделитель	
Короткозамыкатель	
Выключатель путевой: а) однополюсный	
б) многополюсный, например трехполюсный	
Разъединитель трехполюсный	
Переключатель многополюсный, например трехполюсный	

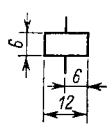
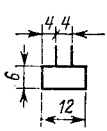
Наименование	Обозначение
Выключатель кнопочный нажимный:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный вытяжной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный поворотный:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Выключатель кнопочный без самовозврата:	
а) нажимной с возвратом посредством вытягивания кнопки	
б) нажимной с возвратом посредством вторичного нажатия кнопки	
Переключатель однополюсный многопозиционный, например четырехпозиционный	
Переключатель многопозиционный независимых цепей, например шести цепей	

Продолжение табл. В.4.

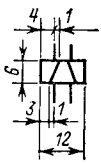
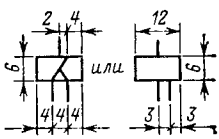
Наименование	Обозначение
Переключатель со сложной коммутацией изображают на схеме одним из следующих способов: по первому способу переключатель изображают в виде условного обозначения, а на поле схемы помещают таблицу замыкания контактов	
по второму способу в положениях *I* замыкаются контакты *I* и *II*, *2* — замыкаются *II*, *III* и *IV* и т. д.	
По третьему способу. В положениях *I* контакт *I* соединяется с шиной *IA*, *2* — контакт *III* соединяется с шиной *IIIA*, а контакт *IV* соединяется с шиной *IVA* и т. д.	
Переключатель двухполюсный трехпозиционный с нейтральным положением	
Переключатель двухполюсный трехпозиционный с самовозвратом в нейтральное положение	
Реле электрическое с замыкающим, размыкающим и переключающими контактами	
Реле электрическое с замыкающими контактами, один из которых срабатывает раньше другого	
Реле поляризованное: а) на одно направление тока в обмотке с самовозвратом	
б) на одно направление тока в обмотке без самовозврата	
в) на оба направления тока в обмотке с нейтральным положением	

Наименование	Обозначение
Примечание. Контакт, отмеченный точкой, замыкается при приложении напряжения постоянного тока, положительный полюс которого подан к выводу, отмеченному точкой	
Реле электротепловое без самовозврата (с возвратом нажатием кнопки)	
Контакты и контактные соединения	
Контакт контактного соединения:	
а) разъемного соединения:	
штырь	
гнездо	
б) разборного соединения	
в) неразборного соединения	
Заземление	
Корпус (машины, аппарата, прибора)	

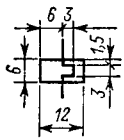
Воспринимающая часть электромеханических устройств (ГОСТ 2.756—76)

Катушка электромеханического устройства	
Примечание. Выводы допускается изображать с одной стороны прямоугольника	

Продолжение табл. В.4.

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства с двумя обмотками	
Катушка электромеханического устройства с *n* обмотками	
Катушка электромеханического устройства с двумя встречными обмотками	
Катушка электромеханического устройства с одним выводом	
Катушка электромеханического устройства трехфазного тока	
Катушка электромеханического устройства с указанием вида обмотки:	
а) обмотка напряжения	
б) обмотка максимального тока	
Катушка поляризованного электромеханического устройства	
Катушка электромеханического устройства, обладающего остаточным намагничиванием	

Продолжение табл. В.4.

Наименование	Обозначение
Катушка электромеханического устройства, имеющего механическую блокировку	
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с ускорением при срабатывании и отпускании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при срабатывании	
Катушка электромеханического устройства, работающего с замедлением при отпускании	
Воспринимающая часть электротеплового реле	

Часть первая

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Глава первая

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При КЗ в сети через токоведущую часть аппарата могут проходить токи, в десятки раз превышающие номинальный. При взаимодействии этих токов с магнитным полем других токоведущих частей аппарата создаются электродинамические усилия (ЭДУ). Эти усилия стремятся деформировать как проводники токоведущих частей, так и изоляторы, на которых они крепятся. При номинальных токах эти усилия малы и ими можно пренебречь.

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять ЭДУ, возникающим при прохождении токов КЗ. Эта величина может выражаться либо непосредственно амплитудным значением тока $i_{дин}$, при котором механические напряжения в деталях аппарата не выходят за пределы допустимых значений, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока

$$k_{дин} = i_{дин}/(\sqrt{2} I_{ном}).$$

Иногда электродинамическая стойкость оценивается действующим значением тока за один период ($T = 0{,}02$ с, $f = 50$ Гц) после начала КЗ.

1.2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

а) Методы расчета. Для расчета ЭДУ используются два метода. В первом ЭДУ определяется как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера.

На элементарный проводник длиной $d\mathbf{l}$, м, с током i, А, находящийся в магнитном поле с индукцией $\mathbf{B}$, Тл, созданной другим проводником (рис. 1.1, *а*), действует усилие

$$d\mathbf{P} = id\mathbf{l}\mathbf{B}; \quad dP = iBdl \sin\beta,$$

где β — угол между векторами элемента $d\mathbf{l}$ и индукции **B**, измеряемый по кратчайшему расстоянию между ними.

За направление $d\mathbf{l}$ принимается направление тока в элементе. Направление индукции **B**, создаваемой другим проводником, определяется по правилу буравчика, а направление усилия— по правилу левой руки.

Для определения полного электродинамического усилия, действующего на проводник длиной l, необходимо просуммировать усилия, действующие на все его элементы:

$$P = \int_0^l dP = \int_0^l Bi \sin \beta dl. \qquad (1.1)$$

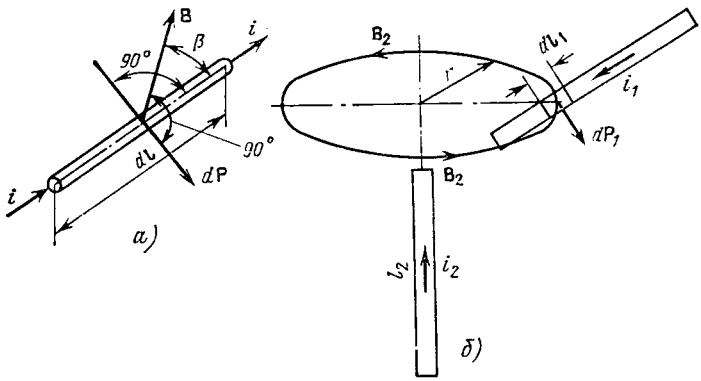


Рис. 1.1. Направление ЭДУ, действующего на элемент с током

В случае произвольного расположения проводников в одной плоскости $\beta = 90°$ и (1.1) упрощается:

$$P = \int_0^l Bidl. \qquad (1.2)$$

Описанный метод рекомендуется применять тогда, когда индукцию в любой точке проводника можно найти аналитически, используя закон Био — Савара — Лапласа.

Второй метод основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током [1.1]. Если пренебречь электростатической энергией системы и принять, что при деформации токоведущих контуров или их пере-

мещении под действием ЭДУ токи в них неизменны, то усилие можно найти по уравнению

$$P = \partial W/\partial x, \qquad (1.3)$$

где W — электромагнитная энергия; x — возможное перемещение в направлении действия усилия.

Таким образом, усилие определяется частной производной от электромагнитной энергии данной системы по координате, в направлении которой оно действует. Эта формула получила название энергетической.

Электромагнитная энергия системы обусловлена как энергией магнитного поля каждого изолированного контура, так и энергией, определяемой магнитной связью между контурами, и для двух взаимосвязанных контуров

$$W = (1/2)\, L_1 i_1^2 + (1/2)\, L_2 i_2^2 + M i_1 i_2, \qquad (1.4)$$

где L_1, L_2 — индуктивности изолированных контуров; i_1, i_2 — токи, протекающие в них; M — взаимная индуктивность.

Первые два члена уравнения определяют энергию независимых контуров, а третий член определяет энергию, обусловленную их магнитной связью.

Уравнение (1.4) позволяет рассчитать как усилия, действующие в изолированном контуре, так и усилие взаимодействия одного контура с другими.

Усилие внутри одного независимого контура

$$P = \partial W/\partial x = (1/2)\, i^2\, \partial L/\partial x. \qquad (1.5)$$

При расчете усилия взаимодействия контуров считаем, что энергия изменяется только в результате изменения взаимного расположения контуров. Энергия, обусловленная их собственной индуктивностью, считается неизменной. При расчете можно считать, что токи в контурах не зависят от их деформаций или их перемещения под действием усилий. В данном случае усилие взаимодействия между двумя контурами

$$P = \partial W/\partial x = i_1 i_2\, \partial M/\partial x.$$

Энергетический метод удобен, когда известна аналитическая зависимость индуктивности или взаимной индуктивности от геометрических размеров.

б) Направление действия ЭДУ. Найдем направление ЭДУ, действующего на элемент dl_1 с током i_1 (рис. 1.1, *б*). Линия индукции $\mathbf{B}_2$, создаваемой током i_2, является окружностью с радиусом r, лежащей в плоскости, перпендику-

лярной l_2. Направление усилия $d\mathbf{P}_1$ определяется по правилу левой руки и показано на рис. 1.1, *б*.

Для плоской задачи, когда все проводники лежат в одной плоскости, результирующая суммарная индукция, действующая на проводник, всегда перпендикулярна этой плоскости. В этой же плоскости действует и усилие.

При определении направления усилия учитывается индукция, создаваемая всеми остальными проводниками, за исключением того проводника, для которого оно находится. Рассмотрим направление усилия, действующего между параллельными проводниками (рис. 1.2, *а*). Проводник *1*

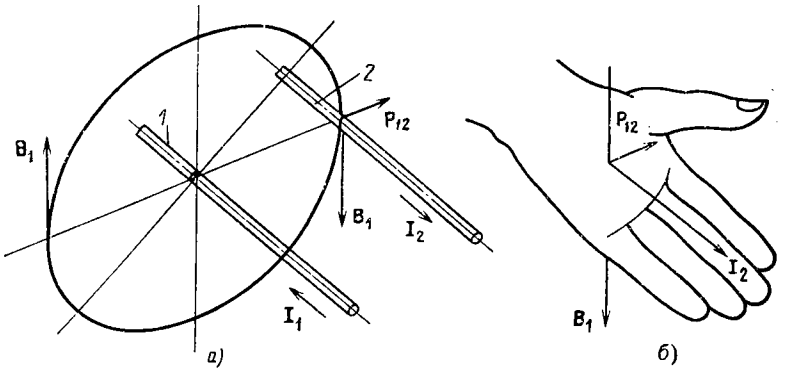


Рис. 1.2. Определение направления ЭДУ с помощью правила левой руки

с током I_1 создает в месте расположения проводника *2* индукцию $\mathbf{B}_1$. По правилу левой руки (рис. 1.2, *б*) определяем направление усилия $\mathbf{P}_{12}$. При этом не следует рассматривать взаимодействие тока I_2 с полем, создаваемым проводником *2*.

Если ЭДУ определяется методом энергетического баланса, направление усилия находят из следующих соображений. Согласно (1.3) положительному направлению усилия соответствует возрастание энергии системы $\partial W/\partial x > 0$. Таким образом, усилие, действующее на токоведущие части, направлено так, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Электромагнитная энергия кольцевого контура (см. рис. 1.8)

$$W = (1/2)\,Li^2 = (1/2)\,\Psi i = (1/2)\,\omega\Phi i,$$

где Ψ — потокосцепление; Φ — магнитный поток; w — число витков в контуре.

В этом случае ЭДУ действует по радиусу, растягивая контур, так как при этом индуктивность, потокосцепление и магнитный поток в рассматриваемой системе возрастают.

При двух витках (см. рис. 1.9) или катушках с разными направлениями токов усилие **P** направлено так, чтобы отбросить витки друг от друга, так как потокосцепление увеличивается с ростом расстояния y. Минимальное потокосцепление соответствует $y = 0$. Если токи текут в одинаковом направлении, то витки притягиваются.

1.3. УСИЛИЯ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПРОВОДНИКАМИ

Рассмотрим бесконечно тонкие проводники конечной длины (рис. 1.3). В этом случае легко аналитически найти индукцию в любой точке пространства. Поэтому для определения усилия воспользуемся первым методом.

Согласно закону Био — Савара — Лапласа элементарная индукция от элемента тока $i_1 dy$ в месте расположения элемента dx

$$dB = d\mu_0 H = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1\, dy}{r^2} \sin\alpha, \tag{1.6}$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; α — угол между током i_1 и лучом r, проведенным от dy к dx.

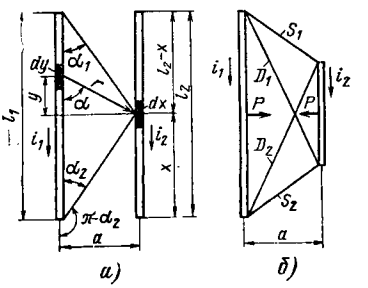


Рис. 1.3. ЭДУ между параллельными проводниками

Полная индукция от проводника l_1 в месте расположения элемента dx

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_0^{l_1} \frac{\sin\alpha}{r^2}\, dy. \tag{1.7}$$

Перейдем к переменной α:

$$y = \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha}; \quad r = \frac{a}{\sin\alpha}; \quad dy = -\frac{a}{\sin^2\alpha}\, d\alpha.$$

После подстановки y, r и dy в (1.7) получим

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_{\pi-\alpha_2}^{\alpha_1} -\frac{\sin\alpha}{\alpha} d\alpha = i_1 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{a}. \quad (1.8)$$

Усилие взаимодействия между проводником l_1 и элементом dx

$$dP_x = Bi_2\, dx = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{a} i_1 i_2\, dx. \quad (1.9)$$

Для определения полного усилия, действующего на проводник l_2, подставим (1.8) в (1.1).

Переменной интегрирования теперь является x — координата на проводнике l_2. Углы α_1 и α_2 для каждой точки выражаются через переменную x следующим образом:

$$\cos\alpha_1 = \frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}}; \quad \cos\alpha_2 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}},$$

тогда

$$P = \frac{10^{-7}}{a} i_1 i_2 \int_0^{l_2} \left[\frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right] dx.$$

Если $l_1 = l_2 = l$, то

$$P_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]. \quad (1.10)$$

Произведение $\frac{2l}{a}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$, называемое коэффициентом контура k, зависит только от размеров проводников и их расположения. Тогда

$$P_x = 10^{-7} k i_1 i_2. \quad (1.11)$$

Если расстояние между проводниками значительно меньше их длины, т. е. $a/l \ll 1$, то k можно принять равным $2l/a$ (случай бесконечно длинных шин). При $a/l \leqslant 0{,}1$ и $k = 2l/a$ расчет по (1.11) дает погрешность, не превышающую 5 %. Для двух произвольно расположенных параллельных проводников разной длины (рис. 1.3, *б*) получена формула

$$k = \frac{\Sigma D - \Sigma S}{a} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a}, \quad (1.12)$$

где ΣD — сумма диагоналей трапеции, построенной по

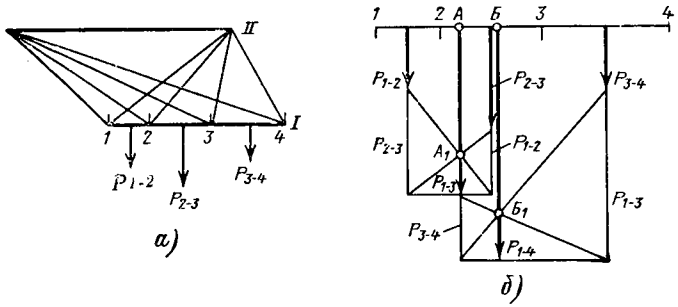


Рис. 1.4. Определение равнодействующей ЭДУ

размерам взаимодействующих проводников; ΣS — суммарная длина боковых сторон этой трапеции; a — расстояние между проводниками. Необходимо указать, что при взаимодействии как угодно параллельно расположенных проводников разной длины силы, действующие на них, одинаковы. Точки приложения равнодействующих сил не находятся в их середине и определяются графоаналитическим путем. Рассмотрим определение точки приложения равнодействующей для отрезка *I*. Отрезок *I* разбивается на участки (рис. 1.4, *а*), длина которых тем меньше, чем больше ожидаемое значение индукции на участке. После этого находятся ЭДУ $\mathbf{P}_{1-2}$, $\mathbf{P}_{2-3}$, $\mathbf{P}_{3-4}$, действующие между участками *1—2*, *2—3*, *3—4* и проводником *II* и приложенные посредине этих участков. Для этого вектор $\mathbf{P}_{1-2}$ продолжаем на длину, равную $\mathbf{P}_{2-3}$, а вектор $\mathbf{P}_{2-3}$ — на длину, равную $\mathbf{P}_{1-2}$. На полученных отрезках строится прямоугольник (рис. 1.4, *б*). Конец вектора $\mathbf{P}_{1-2}$ соединяется с нижней правой вершиной, а конец вектора $\mathbf{P}_{2-3}$ с нижней левой вершиной прямоугольника. Прямая, проведенная параллельно вектору $\mathbf{P}_{1-2}$ через точку пересечения A_1 является результирующим вектором $\mathbf{P}_{1-3}$ с точкой приложения *А*. Аналогично находится равнодействующая векторов $\mathbf{P}_{1-3}$ и $\mathbf{P}_{3-4}$ с точкой приложения *Б*.

При нахождении ЭДУ было принято, что сечение проводников бесконечно мало и весь ток идет по их геометрической оси. В действительности сечение проводников всегда конечно. Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии вокруг проводников и в этом случае представляют собой окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Следует отметить, что

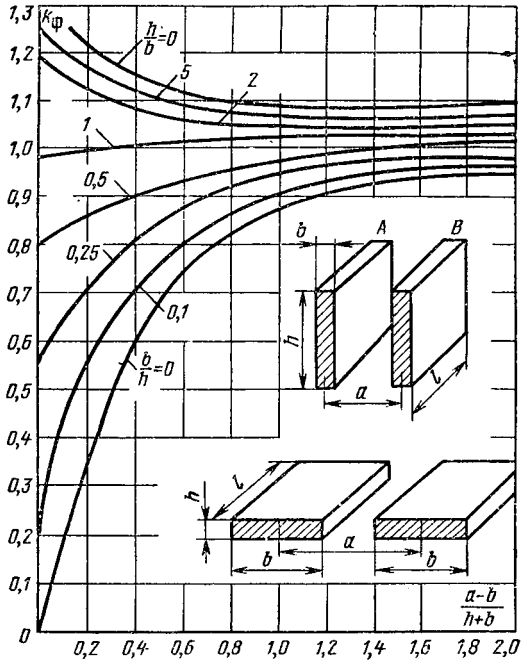


Рис. 1.5. Кривые Двайта, учитывающие влияние размеров поперечного сечения проводника

поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на ЭДУ, а эффект близости, смещающий токи в проводниках, вызывает увеличение ЭДУ при встречных и уменьшение при согласных токах.

При прямоугольной форме сечения его размеры влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии около проводников являются не окружностями, а овалами. Это влияние учитывается с помощью кривых Двайта (рис. 1.5), по которым находится коэффициент формы k_Φ, после чего значение ЭДУ находится как

$$P = 10^{-7} k k_\Phi i_1 i_2. \qquad (1.13)$$

1.4. УСИЛИЯ И МОМЕНТЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫЕ ПРОВОДНИКИ

В электрических аппаратах очень часто токоведущие части располагаются под прямым углом (рис. 1.6, *а*). Ради упрощения задачи примем, что ток течет по геоме-

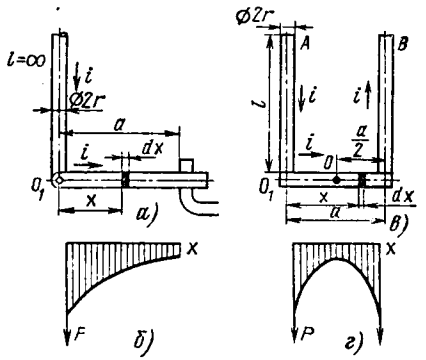


Рис. 1.6. ЭДУ между взаимно перпендикулярными проводниками

трической оси проводников и вертикальный проводник уходит в бесконечность.

Усилие, действующее на элемент d_x горизонтального проводника (перемычки),

$$dP_x = iB_x\,dx.$$

Индукция B_x от вертикального полубесконечного проводника в точке на расстоянии x от его оси

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i}{x}. \qquad (1.14)$$

Указанный закон изменения индукции справедлив во всех точках горизонтального проводника, за исключением $x<r$.

Усилие, действующее на участке от r до x,

$$P_x = \int_r^x iB_x\,dx = \int_r^x i\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i}{x}\,dx = 10^{-7}\,i^2\ln\frac{x}{r}.$$

Полное усилие P, действующее на перемычку на длине от r до a,

$$P = \frac{\mu_0}{4\pi}\,i^2\ln\frac{a}{r} = 10^{-7}\,i^2\ln\frac{a}{r};\quad k = \ln\frac{a}{r}. \qquad (1.15)$$

Если длина вертикального проводника конечна, то реальные значения индукции и усилия меньше, чем рассчитанные по (1.14), (1.15). Для учета конечной длины вертикальных проводников необходимо в формулу Ампера подставлять индукцию, определенную по формуле Био — Савара — Лапласа (1.6).

Распределение усилия вдоль перемычки представлено на рис. 1.6, *б*. По мере удаления от оси вертикального проводника индукция и ЭДУ уменьшаются.

В ряде аппаратов токоведущая цепь может иметь вид петли (рис. 1.6, *в*). На перемычку (траверсу) в этом случае действует усилие как от правого, так и от левого вертикального проводников, т. е. усилие, полученное по (1.15), удваивается. Если петля выполнена из проводников круглого сечения радиусом r, то усилие можно найти энергетическим методом.

Индуктивность П-образной петли

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \left(\ln \frac{a}{r} + 0{,}25 \right). \qquad (1.16)$$

Продифференцировав (1.16) по l и подставив полученное выражение в (1.5), получим

$$P = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dl} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + 0{,}25 \right). \qquad (1.17)$$

Коэффициент 0,25 учитывает усилие, возникающее в месте перехода тока из одного проводника в другой.

Если длина l соизмерима с расстоянием a, то ЭДУ рассчитывается по формуле, учитывающей влияние конечной длины вертикального проводника:

$$P = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left[\ln \frac{2a}{r \left(1 + \sqrt{(a/l)^2 + 1} \right)} + 0{,}25 \right]. \qquad (1.18)$$

Можно показать [1.2], что в общем случае, когда длины горизонтального и вертикального проводников разные или они расположены несимметрично относительно угла, усилия, действующие на них, неодинаковы (а не равны, как это имеет место при параллельных взаимодействующих проводниках).

Довольно часто необходимо определять момент ЭДУ относительно точки вращения или крепления контакта. Рассчитаем изгибающий момент, создаваемый ЭДУ в точке *0*, считая ее точкой крепления (рис. 1.6, *а*). Примем, что вертикальные проводники бесконечны и ток сосредоточен по их геометрическим осям.

Элементарный момент dM, Н·м, на расстоянии x от левого проводника

$$dM = dM_1 + dM_2,$$

где dM_1 — элементарный момент от левого проводника,

$$dM_1 = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{i^2}{x}\left(x - \frac{a}{2}\right)dx = 10^{-7}\frac{i^2}{x}\left(x - \frac{a}{2}\right)dx,$$

а dM_2 — элементарный момент от правого проводника,

$$dM_2 = 10^{-7}\frac{i^2}{a-x}\left(x - \frac{a}{2}\right)dx.$$

Суммарный момент

$$M = \int_{a/2}^{a} dM_1 + \int_{a/2}^{a-r} dM_2 = \int_{a/2}^{a} 10^{-7}\frac{i^2}{x}\left(x - \frac{a}{2}\right)dx + \int_{a/2}^{a-r} 10^{-7}\frac{i^2}{a-x}\left(x - \frac{a}{2}\right)dx.$$

После интегрирования получим

$$M = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2}\left(\ln\frac{a}{4r} + \frac{2r}{a}\right).$$

Кроме ЭДУ от левого и правого проводников создается изгибающий момент за счет усилия, возникающего в месте перехода тока. Полный момент относительно точки *0*

$$M_0 = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2}\left(\ln\frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} + 0{,}25\right). \qquad (1.19)$$

В практике токоведущие контуры могут быть довольно сложными и состоять из большого числа проводников. Расчет результирующего ЭДУ, действующего на отдельные звенья таких контуров, по аналитическим формулам сложен, а иногда невозможен. Для этих случаев рекомендуется приближенный метод, пригодный даже при расположении проводников в разных плоскостях [1.2]. Проводник, для которого определяются ЭДУ, разбивается на несколько равных участков. С помощью (1.8) определяется результирующая индукция на каждом участке от всех остальных токоведущих частей. Когда все проводники лежат в одной плоскости, векторы индукции, создаваемой ими в данной точке, лежат на одной прямой, перпендикулярной этой плоскости. Результирующая индукция находится путем алгебраического сложения отдельных составляющих.

Усилие, действующее на участок длиной Δl,

$$p_{уч} = B_{уч,ср}\, i\Delta l, \qquad (1.20)$$

где $B_{уч,ср}$ — индукция в середине участка Δl от всех остальных частей контура; i — значение тока в участке Δl.

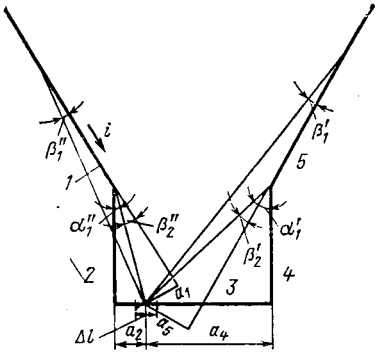


Рис. 1.7. Графоаналитическое определение ЭДУ

Аналогичный расчет проводится для всех участков проводника. Используем этот метод для расчета усилий, действующих в токоведущем контуре масляного выключателя рис. 1.7. Этот контур разобъем на участки *1—2—3—4—5*. Допустим, необходимо найти усилие, действующее на траверсу (перемычку) *3*. На траверсе *3* выделим участок Δl и найдем индукции B_1, B_2, B_4, B_5, создаваемые участками *1, 2, 4, 5* контура:

$$B_{\text{уч,ср}} = -B_1 + B_2 + B_4 + B_5,$$

где B_1, B_2, B_4, B_5 — модули индукций, создаваемых проводниками *1—5*.

Индукцию от всех проводников можно найти, воспользовавшись (1.8):

$$B_1 = 10^{-7}\frac{i}{a_1}\left[\cos\beta_1'' + \cos\left(\pi - \beta_2''\right)\right]; \quad B_2 = 10^{-7}\frac{i}{a_2}\cos\alpha_1''.$$

Подобный расчет проводится для всех участков проводника *3*, после чего строится эпюра распределения усилия вдоль траверсы. Результирующее усилие равно сумме усилий, действующих на участки. Точку приложения равнодействующей находим по методике § 1.3 или по [1.4].

Описанный метод расчета дает приближенное распределение ЭДУ вдоль проводника. Изгибающий момент, создаваемый ЭДУ относительно любой точки, может быть определен по известным правилам механики.

1.5. УСИЛИЯ В ВИТКЕ, КАТУШКЕ И МЕЖДУ КАТУШКАМИ

а) ЭДУ в витке. Индуктивность, Гн, кругового витка (рис. 1.8) при $r/R \leqslant 0{,}25$ определяется с точностью до 1 % по формуле

$$L = \mu_0 R\left(\ln\frac{8R}{r} - 1{,}75\right). \qquad (1.21)$$

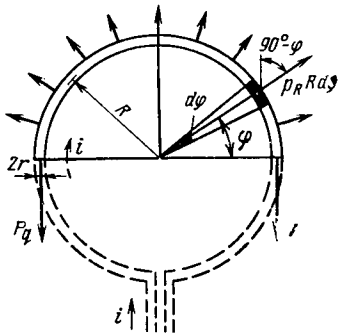


Рис. 1.8. ЭДУ в витке

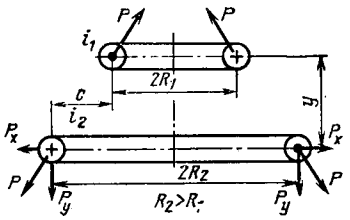


Рис. 1.9. ЭДУ между витками

Поскольку известна аналитическая зависимость индуктивности от размеров витка, при определении ЭДУ целесообразно воспользоваться энергетическим методом. Усилие, действующее в витке, направлено по радиусу, поскольку с ростом радиуса возрастает индуктивность, а следовательно, электромагнитная энергия проводника (1.5). Это усилие, Н,

$$P_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR}. \qquad (1.22)$$

Из (1.21) и (1.22) получим

$$P_R = \frac{\mu_0}{2} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0{,}75\right).$$

Усилие P_R приложено к окружности длиной $2\pi R$. При расчете электродинамической стойкости необходимо знать усилие P_q, действующее в сечении витка и стремящееся его разорвать. Для определения P_q рассмотрим уравнение равновесия полувитка.

Очевидно, что

$$P_q = \int_0^{\pi/2} p_R R d\varphi \sin\varphi, \qquad (1.23)$$

где p_R — усилие, действующее на единицу длины, равное $P_R/(2\pi R)$.

После интегрирования получим

$$P_q = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0{,}75\right). \qquad (1.24)$$

Если виток состоит из w витков, обтекаемых одним током, то индуктивность увеличивается в w^2 раз и разрывающее усилие

$$P_q = 10^{-7}(iw)^2\left(\ln\frac{8R}{r} - 0{,}75\right),$$

где r — радиус сечения окружности, охватывающей w витков.

Если круговой виток находится в магнитном поле, создаваемом другими проводниками, то кроме рассчитанного возникает дополнительное усилие в результате взаимодействия тока витка с этим внешним полем.

б) ЭДУ в катушке. ЭДУ в катушке направлены так, чтобы ее потокосцепление возрастало. Они стремятся сжать катушку по высоте и толщине и увеличить ее средний диаметр. Для нахождения усилий, действующих в различных точках цилиндрической катушки, определяют индукцию в этих точках и проводят расчет по (1.2).

в) ЭДУ между витками и между катушками. Рассмотрим усилие взаимодействия двух круговых витков (рис. 1.9). Если расстояние между витками соизмеримо с диаметрами и последние мало отличаются друг от друга, то их взаимная индуктивность, Гн, может быть выражена как

$$M = \mu_0 R_1\left(\ln\frac{8R_1}{\sqrt{y^2+c^2}} - 2\right), \qquad (1.25)$$

где $c = R_2 - R_1$.

Рассмотрим усилие, действующее на виток с током i_2. Вертикальная составляющая усилия согласно (1.3)

$$P_y = \frac{dW}{dy} = i_1 i_2 \frac{dM}{dy} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{R_1 y}{y^2+c^2}. \qquad (1.26)$$

Горизонтальная составляющая усилия

$$P_x = \frac{dW}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{R_1 c}{y^2+c^2}. \qquad (1.27)$$

Рассмотрим зависимость вертикальной составляющей усилия, действующего между витками при токе в них, равном 1 А, от параметров $\beta = R_2/R_1$ и $\alpha = y/R_1$ (рис. 1.10). Максимального значения усилие достигает при $\beta = 1$, когда радиусы витков одинаковы. По мере уменьшения расстояния y вертикальная составляющая увеличивается.

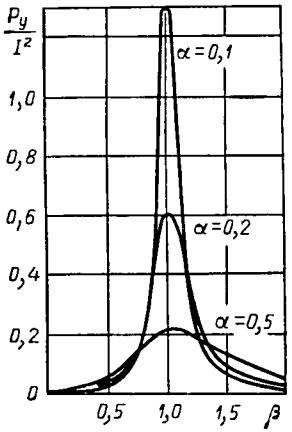


Рис. 1.10. Зависимость вертикальной составляющей ЭДУ между витками от параметров $\alpha = y/R_1$ и $\beta = R_1/R_2$

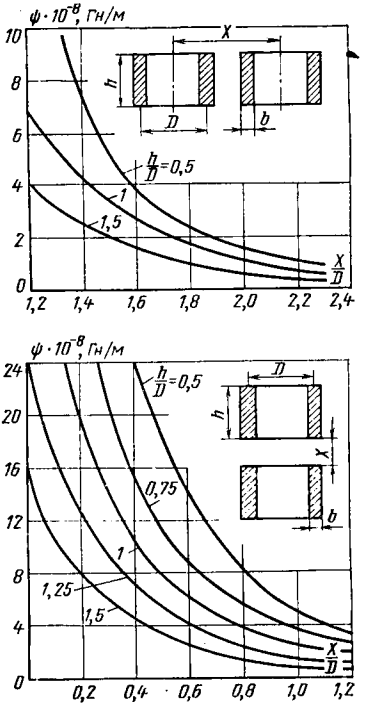


Рис. 1.11. К определению ЭДУ между катушками

Для расчета усилий, действующих между цилиндрическими катушками, удобно пользоваться формулой

$$P = i_1 i_2 \frac{dM}{dx}.$$

Взаимная индуктивность M между двумя катушками с токами i_1 и i_2 и числами витков w_1 и w_2

$$M = \Psi/i_1 = w_2 \Phi/i_1,$$

где Φ — поток, пронизывающий вторую катушку; i_1 — ток в первой катушке.

По определению (§ 5.1)

$$\Phi = F_1 \Lambda, \quad F_1 = i_1 w_1,$$

где Λ — магнитная проводимость, определяющая поток Φ; $F_1 = i_1 w_1$ — МДС первой катушки. Тогда

$$M = w_2 F_1 \Lambda / i_1 = w_1 w_2 \Lambda.$$

Усилие взаимодействия между двумя катушками

$$P = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} = F_1 F_2 \frac{d\Lambda}{dx} = F_1 F_2 \psi. \qquad (1.28)$$

Коэффициент ψ, Гн/м, зависит от размеров катушек и их расположения и определяется с помощью кривых Двайта (рис. 1.11). Подробные сведения по расчету усилий между катушками приведены в [1.2].

1.6. УСИЛИЯ В МЕСТЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Рассмотрим линии тока при переходе из проводника малого сечения в проводник большого сечения и их симметричном расположении (рис. 1.12). При изменении сечения проводника линии тока искривляются. Ток i, взаимодействуя с индукцией B, создает усилие P, имеющее продольную P_2 и поперечную P_1 составляющие. Продольная составляющая стремится разорвать место перехода вдоль оси проводника и направлена в сторону большего сечения [1.4]

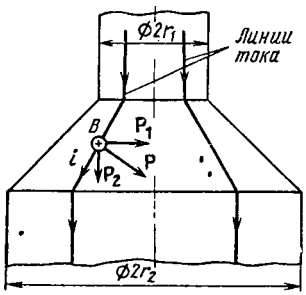


Рис. 1.12. ЭДУ в месте изменения сечения проводника

$$P_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1}. \qquad (1.29)$$

ЭДУ, возникающее при изменении сечения, зависит только от соотношения конечного и начального радиусов и не зависит от формы перехода при осесимметричном проводнике. Подробный расчет этих усилий см. в [1.4].

В электрических аппаратах при переходе тока из одного контакта в другой происходит искривление линий тока, аналогичное рассмотренному. На рис. 3.2 показано соприкосновение контактов по круговой площадке касания $\pi r_к^2 = \pi a^2$. Если принять, что эта площадка находится в центре цилиндрических контактов, то усилие, действующее на каждый контакт (усилие отброса),

$$P = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r}{r_к} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r}{r_к}, \qquad (1.30)$$

где r — радиус контакта; $r_к$ — радиус площадки касания.

При номинальных токах усилие P невелико, а при токах КЗ может достигать многих десятков килоньютон.

Для того чтобы при протекании токов КЗ один контакт не отбра-

сывался от другого, контактное нажатие $P_к$ должно быть больше усилия отброса P, что достигается применением соответствующих контактных пружин.

1.7. УСИЛИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТЕЙ

При приближении проводника с током к ферромагнитной стенке с бесконечно большой магнитной проницаемостью магнитная проводимость, а следовательно, и магнитный поток увеличиваются. Электромагнитная энергия системы возрастает:

$$W = \frac{1}{2} i\Psi = \frac{1}{2} iw\Phi; \qquad W = \frac{1}{2} i\Phi \text{ при } w = 1.$$

На проводник действует усилие, притягивающее его к стенке,

$$P = \frac{1}{2} i \frac{d\Phi}{dx}. \tag{1.31}$$

Для расчета усилия используют метод зеркальных отображений.

Магнитное поле не изменится, если ферромагнитную стенку отбросить, а вместо нее симметрично расположить второй проводник с таким же током (рис. 1.13). Тогда силу взаимодействия проводника и стенки можно рассматривать как силу взаимодействия между двумя проводниками с током i, находящимися на расстоянии $2a$ [см. (1.10)].

В дугогасительных камерах аппаратов низкого напряжения широко применяется решетка из набора ферромагнитных пластин с пазом (§ 4.11). Между пластинами (рис. 1.14) имеются воздушные зазоры. Электрическая дуга, являясь проводником с током, взаимодействует с ферромагнитными пластинами, и создается усилие, которое перемещает дугу вверх, пока она не пересечет пластины. В этот момент создаются условия для ее гашения.

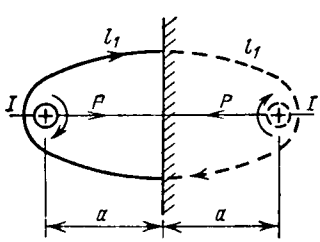


Рис. 1.13. ЭДУ между проводником и ферромагнитной стенкой

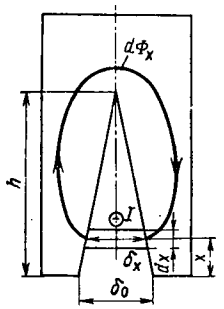


Рис. 1.14. ЭДУ, действующие на дугу в решетке дугогасительной камеры

Рассмотрим расчет усилия, действующего на дугу. Пренебрегая магнитным сопротивлением стали пластин решетки и потоками рассеяния с их торцов, получаем усилие, действующее на проводник (дугу) согласно (1.31):

$$P = \frac{1}{2} i \frac{d\Phi}{dx} .$$

Согласно (5.1) элементарный поток $d\Phi$, связанный с проводником, находящимся на расстоянии x от нижнего торца решетки,

$$d\Phi_x = id\Lambda = i\mu_0 \frac{ldx}{\delta_x} , \qquad (1.32)$$

где $d\Lambda$ — магнитная проводимость промежутка длиной δ_x и сечением ldx; l — активная длина стали решетки.

Воспользовавшись (1.31) и (1.32), получим

$$P_x = \frac{1}{2} i \frac{d\Phi}{dx} = \frac{1}{2} \mu_0 i^2 \frac{l}{\delta_x} = \frac{1}{2} \mu_0 i^2 \frac{lh}{\delta_0 (h - x)} =$$

$$= 2\pi \cdot 10^{-7} i^2 \frac{lh}{\delta_0 (h - x)} ,$$

где $\delta_x = \delta_0 \frac{h - x}{h}$ — зазор, соответствующий координате x.

По мере роста x усилие возрастает и при $x = h$ стремится к бесконечности. По мере уменьшения δ_x будет возрастать падение магнитного потенциала в стали. Полученным уравнением можно пользоваться, если падение магнитного потенциала в стали не превышает 10 % общей МДС.

Усилие, действующее на дугу, зависит от ее формы, которая после расхождения контактов имеет вид части окружности. Это приводит к тому, что сначала в решетку входит средняя часть дуги, а потом крайние ее части. Поэтому приведенный расчет носит ориентировочный характер.

1.8. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ АППАРАТОВ

При расчете контакторов, автоматов защиты и ряда других электрических аппаратов необходимо учитывать большие ЭДУ, действующие в их токоведущих частях при режиме КЗ.

а) Однофазная цепь. Пусть ток в проводнике и токоведущих частях не имеет апериодической составляющей и изменяется по закону

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где I_m — амплитудное значение тока; ω — угловая частота.

При одинаковом направлении тока проводники притягиваются с усилием

$$P = 10^{-7} kI_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2}(1 - \cos 2\omega t), \qquad (1.33)$$

где P_m — максимальное значение усилия, равное $10^{-7}\ kI_m^2$.

Таким образом, усилие имеет постоянную составляющую $P_m/2$ и переменную составляющую двойной частоты $(P_m/2)\cos 2\omega t$. Среднее значение усилия за период

$$P_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T P dt = \frac{P_m}{2} = 10^{-7} k \frac{I_m^2}{2} = 10^{-7} kI^2 = cI^2;$$

$$c = 10^{-7} k, \qquad (1.34)$$

где I — действующее значение тока.

Таким образом, среднее значение ЭДУ пропорционально квадрату действующего значения тока. Изменение усилия во времени при переменном токе в однофазной цепи (рис. 1.15) происходит без изменения своего знака.

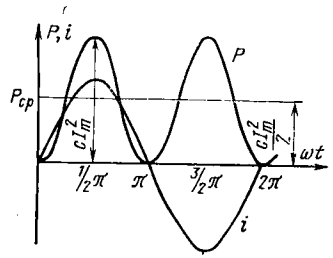


Рис. 1.15. Зависимость $P(t)$ при синусоидальном токе ($c = 10^{-7}\ k$)

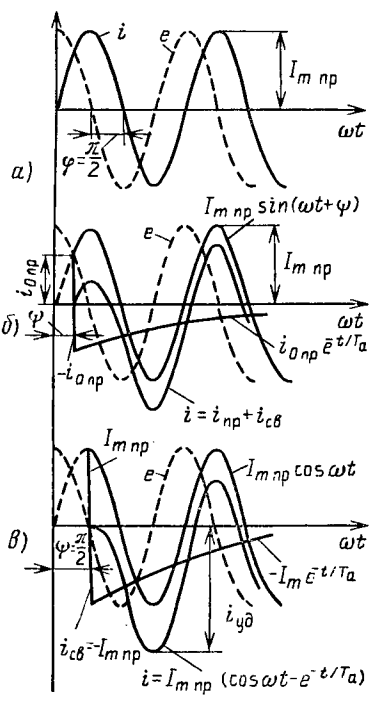


Рис. 1.16. Образование апериодической составляющей тока включения ($\omega L \gg R$; $\varphi \approx \pi/2$):

а — апериодическая составляющая тока отсутствует ($\psi = 0$), при $t = 0$ $e = E_m$, $i_{пр} = 0$; *б* — апериодическая составляющая тока появляется. Начальное ее значение $i_{а,нач} = -i_{0пр} = -I_{mпр}\sin\psi$; *в* — апериодическая составляющая максимальна. Начальное значение апериодической составляющей $i_{а,нач} = -I_{mпр}$. Угол включения $\psi = 90°$

Иногда включение аппарата происходит при наличии КЗ в цепи нагрузки. Обычно в сетях высокого напряжения активное сопротивление R цепи и ее индуктивность L связаны соотношением $\omega L \gg R$. Если включение происходит в момент времени, когда принужденная составляющая тока $i_{\text{пр}}=0$, то свободной составляющей в цепи не возникает и апериодическая составляющая отсутствует (рис. 1.16, *а*). На этом рисунке e — ЭДС источника; φ — угол сдвига фаз между ЭДС и током. Если включение происходит в любой другой момент времени, то возникает свободная апериодическая составляющая, которая в момент $t=0$ равна и обратна по знаку принужденной составляющей (рис. 1.16, *б*). Причина возникновения апериодической составляющей — наличие в цепи индуктивности L. Поскольку энергия в индуктивности $Li^2/2$ не может меняться скачком, ток в цепи всегда нарастает с нулевого значения. Если при $t=0$ ток $i_{0\text{пр}}\neq 0$, то возникает свободный ток $i_{\text{св}}=-i_{0\text{пр}}$. Свободная составляющая спадает во времени по закону [1.1]

$$i_{\text{св}} = i_{\text{св}0}\, e^{-t/T_{\text{а}}},$$

где $T_{\text{а}}=L/R$ —постоянная времени апериодической составляющей тока цепи.

Наибольшая апериодическая составляющая появляется при условии $t=0$; $i_{0\text{пр}}=\pm I_{m\text{пр}}$ (рис. 1.16, *в*). Если при $t=0$ $i_{0\text{пр}}=-I_{m\text{пр}}$, то результирующий ток в цепи изменяется по закону

$$i = I_{m\text{пр}}\left(e^{-t/T_{\text{а}}} - \cos\omega t\right). \qquad (1.35)$$

Через время $t=\pi/\omega$ ток в цепи достигает наибольшего значения, которое называется ударным,

$$i_{\text{уд}} = I_{m\text{пр}}\left(1 + e^{-(R/L)\pi/\omega}\right) = k_{\text{уд}}\, I_{m\text{пр}}; \quad k_{\text{уд}} = 1 + e^{-\pi/(\omega T_{\text{а}})}. \qquad (1.36)$$

Ударный коэффициент $k_{\text{уд}}$ зависит от постоянной времени $T_{\text{а}}$. Чем больше индуктивность L и меньше активное сопротивление R, тем больше $k_{\text{уд}}$. Параметры тока КЗ — его величина, угол сдвига фаз между током и напряжением, постоянная времени L/R, зависят от свойств контура КЗ, включающего в себя энергетическую установку (генераторы, трансформаторы), линии передачи, кабели и т. п. При прочих равных условиях с ростом мощности энергетической установки уменьшается сопротивление R и увеличивается $k_{\text{уд}}$. В высоковольтных установках постоянная времени $T_{\text{а}}$ принимается равной 0,05 с. При этом $k_{\text{уд}}=1{,}8$. С ростом

мощностей и напряжений установок T_a увеличивается и в настоящее время достигает 0,3 с. В низковольтных энергетических установках постоянная времени T_a значительно меньше из-за уменьшения индуктивности L и расчетное значение ударного коэффициента принимают равным 1,3.

Следует отметить, что апериодическая составляющая имеет существенное значение только в цепях с $\omega L \gg R$. В этом случае принужденная составляющая тока $i_{пр}$ отстает от напряжения на 90°. Таким образом, наибольшее значение апериодической составляющей соответствует включению цепи при прохождении напряжения через нулевое значение (рис. 1.16, *в*).

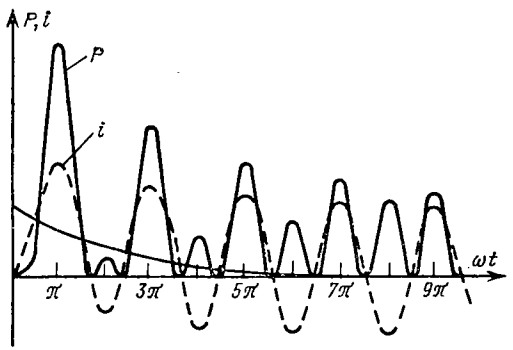


Рис. 1.17. Зависимость $P(t)$ при наличии апериодической составляющей тока

При наличии апериодической составляющей тока усилие изменяется во времени по закону

$$P = 10^{-7} k I_{m\text{пр}}^2 \left(e^{-t/T_a} - \cos \omega t \right)^2 \qquad (1.37)$$

(см. рис. 1.17).

Наибольшего значения усилие достигает через полпериода после начала КЗ. При $k_{уд} = 1{,}8$ будет иметь значение

$$P = 10^{-7} k k_{уд}^2 I_{m\text{пр}}^2 = 3{,}24 \cdot 10^{-7} k I_{m\text{пр}}^2 . \qquad (1.38)$$

Таким образом, апериодическая составляющая в 3,24 раза увеличивает амплитуду усилия.

б) Трехфазная цепь при отсутствии апериодической составляющей тока. Определим ЭДУ, действующие на парал-

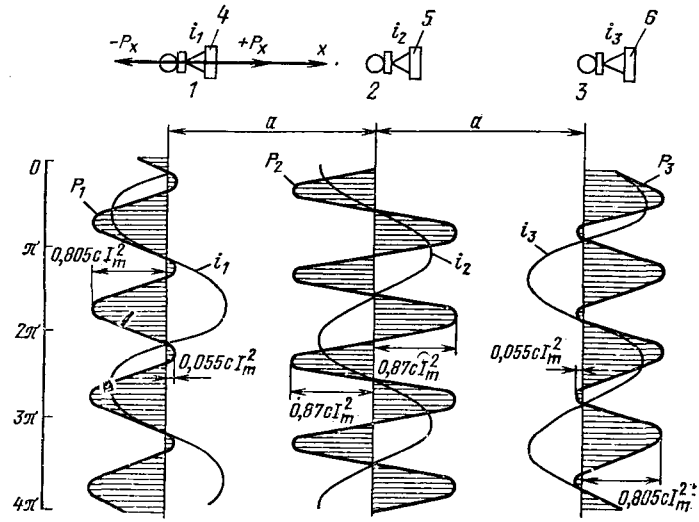


Рис. 1.18. ЭДУ в трехфазной системе

лельные проводники фаз *1—3* трехфазной системы, расположенные в одной плоскости (рис. 1.18). Проводники имеют круглое сечение и жестко укреплены на опорных фарфоровых изоляторах *4—6*. Изоляторы в свою очередь неподвижно закреплены на стальных рейках или на стене.

Предположим, что расстояние a между проводниками мало по сравнению с их длиной, а токи проходят по их геометрическим осям. За положительное направление усилия примем направление оси x. Мгновенные значения токов в проводниках

$$i_1 = I_m \sin \omega t; \quad i_2 = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \quad i_3 = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Усилие, действующее на проводник фазы *1*,

$$P_1 = P_{12} + P_{13},$$

где P_{12} — ЭДУ между проводниками фаз *1* и *2*; P_{13} — ЭДУ между проводниками фаз *1* и *3*.

При принятых допущениях

$$P_{12} = cI_m^2 \sin \omega t \sin(\omega t - 2\pi/3), \tag{1.39}$$

где $c = 10^{-7}\ 2l/a$, l — длина проводника;

$$P_{13} = (1/2)\, cI_m^2 \sin \omega t \sin(\omega t - 4\pi/3); \tag{1.40}$$

$$P_1 = cI_m^2 \sin \omega t \left[\sin (\omega t - 2\pi/3) + \frac{1}{2} \sin (\omega t - 4\pi/3) \right]. \quad (1.41)$$

Изменение усилия, действующего на проводники, показано на рис. 1.18. Усилие меняет знак и достигает в определенные моменты времени максимальных значений отталкивания и притягивания.

Исследовав (1.41) на максимум, получим максимальное значение отталкивающего усилия

$$P_{1\text{от}max} = -0{,}805cI_m^2.$$

Максимальное притягивающее усилие

$$P_{1\text{пр}итmax} = 0{,}055cI_m^2. \quad (1.42)$$

Мгновенное значение усилия, действующего на фазу *2*,

$$P_2 = P_{21} + P_{23} = cI_m^2 [\sin (\omega t - 2\pi/3)][\sin \omega t + \sin (\omega t - 4\pi/3)]. \quad (1.43)$$

Исследование (1.43) показывает, что максимальные значения притягивающего и отталкивающего усилий

$$P_{2\text{от}max} = P_{2\text{пр}итmax} = 0{,}87cI_m^2. \quad (1.44)$$

Проведя аналогично расчет ЭДУ для фазы *3*, получим

$$P_{3\text{от}max} = -P_{1\text{от}max}; \quad P_{3\text{пр}итmax} = -P_{1\text{пр}итmax}. \quad (1.45)$$

Наглядное представление об усилиях, возникающих в трехфазной системе, дает рис. 1.18.

Наибольшее усилие действует на проводник средней фазы. Этот случай принимается за расчетный:

$$P_{max\text{расч}} = 0{,}87cI_m^2. \quad (1.46)$$

Для трехфазной системы, в которой токи i_1, i_2, i_3 сдвинуты на 120°, характерно изменение знака ЭДУ. В какой-то момент времени произведение мгновенных значений токов двух соседних фаз положительно. В другой момент времени то же вследствие фазового сдвига 120° произведение может быть отрицательным.

На изоляторы фаз *1—3* воздействуют усилия как сжатия, так и растяжения, причем растягивающее усилие для изолятора фазы *1* больше, чем сжимающее, для изолятора фазы *2* максимальные растягивающие и сжимающие усилия одинаковы, а для изолятора фазы *3* сжимающие усилия значительно больше растягивающих. Для фарфоровых изоляторов растягивающие усилия более опасны,

чем сжимающие, так как фарфор плохо работает на растяжение. Если на рис. 1.18 изоляторы расположить вертикально, то они работают в более легких условиях, так как деформация растяжения заменяется изгибом.

в) Трехфазная система при наличии апериодической составляющей тока. В однофазной системе теоретически возможен случай КЗ, при котором апериодическая составляющая тока будет равна нулю. В трехфазной системе апериодическая составляющая тока появляется при одновременном замыкании всех трех фаз, так как ни в какой момент времени все три тока не могут быть равны нулю. Наличие этой составляющей в токе КЗ влияет на ЭДУ.

Максимальное значение возникающих в этом случае ЭДУ зависит как от момента включения относительно амплитуды периодической составляющей тока, так и от времени. Решение этой задачи довольно сложно. Поэтому расчет ЭДУ с учетом апериодической составляющей целесообразно проводить по упрощенной методике, обеспечивающей погрешность в сторону запаса. Эта методика полагает, что во всех трех фазах апериодическая составляющая одинакова, равна амплитуде периодической и не меняется во времени. Тогда максимальное отталкивающее усилие, действующее на провод фазы *1*,

$$P_{1отmax} = 0{,}805c\,(k_{уд}\,I_m)^2. \qquad (1.47)$$

Максимальное усилие, действующее на провод средней фазы, согласно (1.46)

$$P_{2max} = 0{,}87c\,(k_{уд}\,I_m)^2. \qquad (1.48)$$

г) Электродинамическая стойкость аппаратов. Механическая прочность элементов конструкции электрических аппаратов зависит от значения ЭДУ, его направления, длительности воздействия и крутизны нарастания. До настоящего времени особенности работы проводников и изоляционных материалов в динамическом режиме изучены недостаточно. Поэтому расчеты прочности конструкций ведутся по максимальному значению ЭДУ, хотя действует оно кратковременно.

В однофазных установках расчет ЭДУ ведется по ударному току КЗ. Если КЗ произошло вблизи генератора, то за расчетное значение берется амплитуда ударного тока генератора в переходном режиме.

Для трехфазного аппарата за расчетный ток берется

$$i_{уд} = k_{уд}\,I_{m3}, \qquad (1.49)$$

где ток I_{m3} — амплитуда периодической составляющей тока трехфазного КЗ.

Расчет электродинамической стойкости проводится для проводников средней фазы, на которые действуют наибольшие значения ЭДУ. Механические напряжения в проводниковых материалах не должны превышать 140 МПа для меди марки МТ и 70 МПа для алюминия марки АТ.

Изоляция электрических аппаратов открытого исполнения (IP00) подвергается воздействию как ЭДУ, так и дополнительных нагрузок—ветра, гололеда, влаги, натяжения подводящих проводников и т. д. Изоляция электрических аппаратов герметичного исполнения (IP67) подвергается только действию ЭДУ. Поэтому в первом случае результирующая нагрузка на изоляторы и изоляционные детали берется в 3 раза меньше разрушающей, во втором случае — в 1,5—1,7 раза.

д) Механический резонанс. При расчете электродинамической стойкости аппарата необходимо учитывать возможность появления резонанса между гармонически меняющимся ЭДУ и собственными механическими колебаниями токоведущих деталей.

В случае, когда частота переменной составляющей ЭДУ близка к собственной частоте механических колебаний, даже при сравнительно небольших усилиях возможно разрушение аппарата вследствие явлений резонанса.

Рассмотрим явления резонанса в токоведущих шинах электрического аппарата.

Шины под воздействием ЭДУ совершают вынужденные колебания в виде стоячих волн. Частота свободных колебаний шин выражается формулой [1.5]

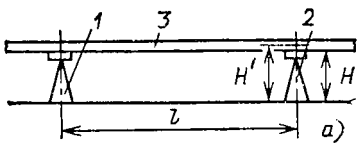
$$f_k = \frac{r_k^2}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}}, \qquad (1.50)$$

где r_k — корни характеристического уравнения свободных колебаний шины; l — длина свободного пролета шины, м; E — модуль упругости, Па; J — момент инерции сечения шины относительно оси изгиба, м^4; m — масса единицы длины шины, кг/м.

Колебания шины имеют только нечетные гармоники, поэтому k принимает значения 1, 3, 5... Коэффициенты r_k являются корнями характеристического уравнения колебания и принимают значения $r_1 = 4{,}79$; $r_3 = 10{,}996$; $r_k = (2k+1)\,\pi/2$ при $k \geqslant 5$. Если частота свободных колебаний выше 200 Гц, то расчет усилий, действующих на шины и изо-

ляторы, производится для статического режима без учета резонанса. На рис. 1.19, *а* показаны изоляторы *1*, *2* и жестко закрепленная на них токоведущая шина *3*. Расстояние между изоляторами *l* называется свободным пролетом. На шину действует равномерно распределенное ЭДУ. Усилие на единицу длины шины *p*, Н/м, получают делением полного ЭДУ *P* на длину пролета *l*.

К шине как балке, закрепленной на концах, прикладываются максимальные расчетные усилия, находятся механические напряжения в ней и усилия, действующие на изо-



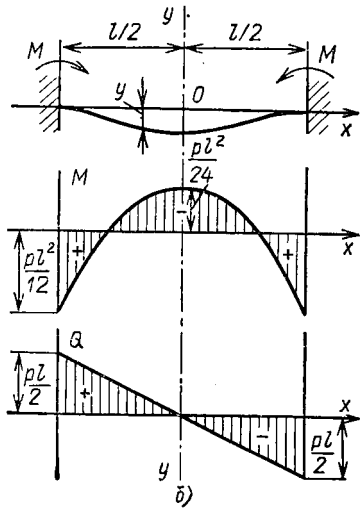


Рис. 1.19. К расчету электродинамической стойкости шин:

а — расчетная схема; *б* — распределение момента *M* и поперечной силы *Q* в шине

ляторы [1.5] (рис. 1.19, *б*). Максимальное механическое напряжение в шине, Па,

$$\sigma_{max} = M/W = \frac{p_{\Phi max} l^2}{12W}, \qquad (1.51)$$

где M — максимальный изгибающий момент, Н·м; W — момент сопротивления, м³; l — длина свободного пролета шины, м; $p_{\Phi max}$ — наибольшее значение удельной электродинамической нагрузки от соседней фазы, Н/м.

Нагрузка на изолятор

$$P_{из} = p_{\Phi max} l.$$

Прочность изолятора проверяется неравенством

$$P_{из} \leqslant 0{,}6 P_{разр} H/H',$$

где $P_{разр}$ — минимальное разрушающее усилие, допустимое для изолятора, Н (берется по каталогу); H — высота изолятора, м; H' — расстояние от основания изолятора до центра тяжести поперечного сечения шины, м.

Если частота свободных колебаний шины $f<200$ Гц, то собственная частота колебаний приближается к частоте ЭДУ (50—100 Гц). При этом значение ЭДУ, действующего на проводники, увеличивается в десятки раз.

Расчет ЭДУ с учетом резонанса дан в [1.5]. При конструировании стремятся исключить возможность резонанса за счет выбора длины свободного пролета шины.

При гибком креплении шины собственная частота механических колебаний снижается. Энергия ЭДУ частично тратится на деформацию токоведущих частей, частично на перемещение их и связанных с ними гибких креплений. При этом механические напряжения в материале шин уменьшаются.

1.9. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШИН

Пусть требуется определить механические напряжения в шинах и изоляторах двухфазной шинной конструкции.

Дано: ток КЗ составляет 20 кА; постоянная времени апериодической составляющей тока 0,05 с. Шины расположены горизонтально, расстояние между фазами 0,6 м. Расстояние между изоляторами 1,3 м. Шины алюминиевые, трубчатые $D/d=70$ мм/64 мм. Опорные изоляторы с минимальной разрушающей нагрузкой 3675 Н и высотой $H=0{,}372$ м. Номинальное напряжение 35 кВ. Расчетная схема показана на рис. 1.19, *а*. Принимаем, что шины имеют жесткое крепление в изоляторах.

Для такой задачи максимальный изгибающий момент в месте крепления $M=pl^2/12$, где p — нагрузка на единицу длины шины, Н/м; l — длина пролета.

Максимальное напряжение в материале шины

$$\sigma_{max}=pl^2/(12W),$$

где W — момент сопротивления изгибу, м^3; $W=\pi(D^4-d^4)/(32D)=0{,}85\cdot10^{-5}$ м^3.

Нагрузка, действующая на изоляторы,

$$P_{из}=pl.$$

Условия механической прочности шин и изоляторов: $\sigma_{max}\leqslant\sigma_{maxдоп}=0{,}7\ \sigma_{разр}$. Для алюминия марки АО $\sigma_{разр}=117\cdot10^6$ Па. Для изоляторов $P_{из}\leqslant0{,}6\ P_{разр}H/H'$.

Частота колебаний 1-й гармоники

$$f_1 = \frac{r_1}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}}.$$

Подставив значения $r_1=4{,}73$, $l=1{,}3$ м, $E=7\cdot10^{10}$ Н/м², $m=s\delta=1{,}7$ кг/м — масса шины на единицу длины; $s=6{,}31\cdot10^{-4}$ м² — сечение шины, $\delta=2700$ кг/м³ — плотность; J — момент инерции круглой шины, $J=\pi(D^4-d^4)/64=3\cdot10^{-7}$ м⁴, получим

$$f_1 = \frac{4{,}73}{2\pi\cdot1{,}3^2}\sqrt{\frac{7\cdot10^{10}\cdot3\cdot10^{-7}}{1{,}7}} = 234 \text{ Гц}.$$

Поскольку полученное значение $f_1>100$ Гц, явления резонанса можно не учитывать:

$$p = 1{,}02kk_\Phi\frac{i_{уд}^2}{l}10^{-7}.$$

Поскольку $l\gg a$, можно принять $k=2l/a$. Для круглых проводников $k_\Phi=1$. Ударный ток $i_{уд}=1{,}8\sqrt{2}\cdot20\cdot10^3=50{,}8$ кА;

$$p = 1{,}02\cdot10^{-7}\cdot2\,(50{,}8\cdot10^3)^2/0{,}6 = 880 \text{ Н/м};$$

$$\sigma_{max} = \frac{pl^2}{12W} = \frac{880\cdot1{,}3^2}{12\cdot0{,}85\cdot10^{-5}} = 145{,}5\cdot10^5 < 117\cdot10^6;$$

$$P_{из} = pl = 880\cdot1{,}3 = 1142 \text{ Н} < 0{,}6\cdot3675\cdot0{,}372/0{,}407 = 2010 \text{ Н}.$$

Таким образом, конструкция шин выполнена с запасом по механической прочности.

Глава вторая

НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В токоведущих, изолирующих и конструктивных деталях электрических аппаратов возникают потери электрической энергии в виде тепла. В общем случае тепловая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично рассеивается в окружающей среде.

При повышении температуры происходит ускоренное старение изоляции проводников и уменьшение их механической прочности. Например, срок службы изоляции при возрастании длительной температуры всего лишь на 8 °С выше номинальной сокращается в 2 раза.

При увеличении температуры от 100 до 250 °С механи-

ческая прочность меди снижается на 40 %. Эти процессы осложняются тем, что при КЗ, когда температура может достигать 200—300 °С, на токоведущие детали воздействуют большие электродинамические усилия. Устойчивая работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

Нагрев токоведущих частей и изоляции аппарата в значительной степени определяет его надежность. Поэтому во всех возможных режимах работы температура их не должна превосходить таких значений, при которых обеспечивается заданная длительность работы аппарата.

2.2. АКТИВНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В АППАРАТАХ

а) Потери в токоведущих частях. В аппаратах постоянного тока нагрев происходит только за счет потерь в активном сопротивлении токоведущей цепи.

Энергия, Дж, выделяющаяся в проводнике,

$$W = \int_0^t i^2 R dt,$$

где i — ток в цепи, А; R — активное сопротивление проводника, Ом; t — длительность протекания тока, с.

При постоянном токе сопротивление проводника R легко найти, зная его материал, длину, сечение и удельное сопротивление ρ.

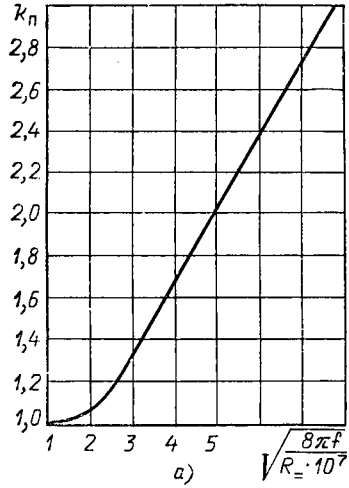
Активное сопротивление проводника различно при постоянном и переменном токе из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. При переменном токе

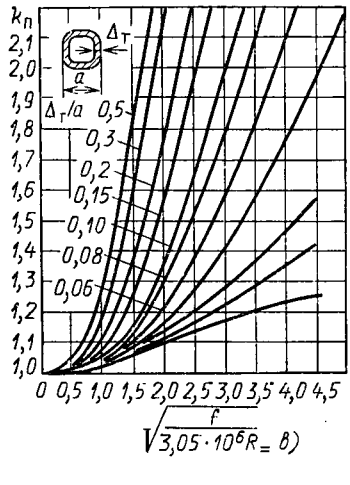
$$R = R_{=} k_{доб}, \qquad (2.1)$$

где $R_{=}$ — сопротивление при постоянном токе; $k_{доб}$ — коэффициент добавочных потерь, вызванных поверхностным эффектом и эффектом близости.

Поверхностный эффект. Переменный ток, текущий по проводнику, создает переменное магнитное поле, которое, пересекая тело проводника, наводит в нем ЭДС. Эта ЭДС создает вихревые токи, которые геометрически суммируются с основным переменным током. В результате наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности проводника. По мере перемещения к центру плотность тока быстро спадает. Коэффициент добавочных потерь, обусловленных поверхностным эффектом, обозначается через $k_{п}$.

Чем больше частота тока и меньше удельное сопротивление проводника, тем сильнее проявляется поверхностный эффект и больше $k_{п}$. Существенную роль при этом играют форма и размеры проводника — чем больше его диаметр, тем больше поверхностный эффект.





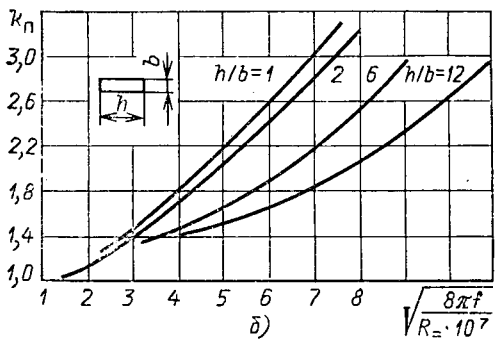


Рис. 2.1. Коэффициент $k_п$:

а — для сплошного круглого проводника; *б* — для шины прямоугольного сечения; *в* — для трубчатого проводника

Из-за поверхностного эффекта внутренняя часть проводников большого сечения не обтекается током и фактически не используется. По этой причине применяются проводники трубчатого или коробчатого сечения. Коробчатое сечение предпочтительнее трубчатого, так как при нем увеличивается поверхность охлаждения и возрастает механическая прочность. Шина с коробчатым сечением выполняется из двух половин, зазор между которыми обеспечивает охлаждение внутренней поверхности. Коэффициент $k_п$ для такого сечения приведен в [2.1]. В зависимости от формы сечения шины $k_п$ определяются по кривым рис. 2.1. На этих рисунках f — частота, Гц, $R_=$ — сопротивление проводника, Ом, при постоянном токе и длине $l=1$ м. В проводниках из ферромагнитного материала из-за увеличения магнитной проницаемости возрастает поток, соз-

даваемый током в проводнике. При этом поверхностный эффект увеличивается во много раз.

Эффект близости. Магнитное поле соседнего проводника пересекает данный проводник и наводит в нем ЭДС. Эта ЭДС создает ток в теле проводника, который геометрически складывается с основным током. В результате ток по сечению распределяется неравномерно.

Отношение активного сопротивления проводника, находящегося в магнитном поле других проводников, к сопротивлению уединенного проводника называется коэффициентом близости

$$k_б = R_{\sim}/R_{\sim\ уед}. \qquad (2.2)$$

Аналогично поверхностному эффекту эффект близости усиливается с частотой тока, электрической проводимостью материала. Коэффициент $k_б$ зависит от формы, взаимного расположения проводников (рис. 2.2) и направления токов в них. Чем ближе расположены проводники друг к другу, тем сильнее магнитное поле от соседнего проводника и тем больше эффект близости. На рис. 2.2 сопротивление $R_{=}$ берется для постоянного тока при длине проводника 100 м. Токи в проводниках направлены встречно.

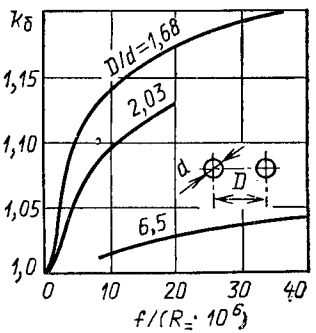


Рис. 2.2. Коэффициент близости $k_б$ для круглых проводников

В отличие от $k_п$ коэффициент $k_б$ может быть и меньше единицы, так как за счет магнитного поля соседних проводников возможно выравнивание плотности тока по сечению. На рис. 2.3 показана зависимость $k_б$ от расстояния Δ между плоскими шинами при их различном взаимном расположении. При расположении параллельных шин в одной плоскости $k_б$ значительно больше (рис. 2.3, *б*), чем в случае, когда плоскости шин параллельны (рис. 2.3, *а*). Для трехфазной системы проводников картина влияния соседних фаз значительно усложняется. Однако можно указать минимальные расстояния между соседними фазами, при которых эффект близости практически ничтожен. Так, при цилиндрических проводниках $k_б = 1$, если расстояние между фазами $D \geqslant 6d$, где d — диаметр проводника. Для прямоугольных шин в трехфазной системе $k_б = 1$, если $D \geqslant 3h$, где h — наибольший размер поперечного сечения.

Используя (2.1) и (2.2), получаем

$$k_{доб} = R_{\sim}/R_{=} = R_{уед}\, k_б/R_{=} = k_п\, k_б. \qquad (2.3)$$

В проводниках из ферромагнитного материала (стали) поверхностный эффект резко увеличивается. Магнитная проницаемость стали на

много порядков выше, чем у меди или алюминия, из-за чего увеличиваются магнитный поток, пронизывающий проводник, и наведенная им ЭДС. В результате увеличивается и ток, вызванный этой ЭДС.

Коэффициент добавочных потерь для стального провода небольшого диаметра ($d=16$ мм) составляет $k_{доб}=4\div8$. Зависимость $k_{доб}$ от тока примерно такая же, как зависимость магнитной проницаемости μ_r от напряженности поля H (§ 5.1). Из-за больших значений $k_{доб}$ ферромагнитные материалы редко применяются для изготовления токоведущих элементов.

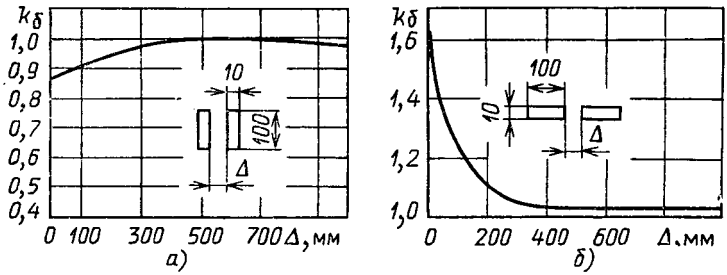


Рис. 2.3. Зависимость коэффициента близости от расположения прямоугольных шин

б) Потери в нетоковедущих ферромагнитных деталях аппаратов. При переменном токе появляются активные потери в ферромагнитных конструкционных деталях, расположенных в переменном магнитном поле. Переменный магнитный поток пересекает ферромагнитные детали, и в них наводятся вихревые токи. Вихревые токи могут нагревать эти детали до высоких температур и создавать дополнительные потери энергии. Рассмотрим прохождение переменного магнитного потока вдоль оси массивного цилиндрического стержня.

Под действием потока в элементарных цилиндрических слоях наводятся ЭДС, под воздействием которых появляются вихревые токи. Направление этих токов таково, что создаваемые ими магнитные потоки противодействуют изменению основного потока. Из-за размагничивающего действия вихревых токов магнитный поток по сечению распределяется неравномерно, причем магнитная индукция минимальна в центре стержня и достигает наибольшего значения на его поверхности. Примерное распределение индукции B и плотности тока J вдоль радиуса стержня показано на рис. 2.4.

Глубина a проникновения электромагнитной волны в тело стержня, м, и удельная мощность потерь $P_{уд}$, Вт/см², выражаются формулами

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_a}}; \quad P_{уд} = 2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\rho f B_m F_{уд}^3}, \qquad (2.4)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала стержня, Ом·м; $2\pi f$ — круговая частота изменения потока, $с^{-1}$; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость материала стержня, Гн/м; $P_{уд}$ — мощность потерь на 1 $см^2$ поверхности; $F_{уд}$ — МДС на единицу длины стержня, А/см; f — частота, Гц; B_m — индукция, Тл.

Чем меньше ρ и выше f и μ_a, тем сильнее эффект вытеснения потока. Аналогичные потери возникают, если вблизи проводника расположены массивные ферромагнитные детали. Чем ближе такая деталь к проводнику, тем больше пронизывающий ее магнитный поток, тем

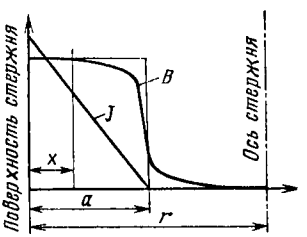


Рис. 2.4. Распределение индукции B и плотности тока J в ферромагнитном стержне при прохождении переменного потока вдоль его оси

больше потери. Кроме потерь от вихревых токов возникают дополнительные потери на перемагничивание ферромагнитного материала за счет гистерезиса.

Для уменьшения потерь в магнитопроводах аппаратов они выполняются шихтованными из листов электротехнической стали толщиной 0,2—0,5 мм, тщательно изолированных друг от друга. При этом сталь должна иметь малые удельные потери на вихревые токи и гистерезис.

Полные потери в стали магнитопровода $P_{ст}$ на гистерезис и вихревые токи могут быть найдены с помощью формулы

$$P_{ст} = \left(\varkappa_г B_m^{1,6} + \varkappa_в f B_m^2\right) fG,$$

где B_m — максимальное значение магнитной индукции в магнитопроводе, Тл; $\varkappa_г$ и $\varkappa_в$ — коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов; G — масса магнитопровода, кг; f — частота тока.

Для применяемых в электрических аппаратах трансформаторных сталей марок 1511, 1512 $\varkappa_г = 1{,}9 \div 2{,}6$, $\varkappa_в = 0{,}4 \div 1{,}2$. Подробные сведения о свойствах электротехнических сталей приведены в [2.2].

Для уменьшения потерь в массивных ферромагнитных деталях применяются следующие методы:

а) увеличивается расстояние от проводника с током до ферромаг-

нитной детали; при этом уменьшается пронизывающий ее магнитный поток;

б) на пути магнитного потока вводится немагнитный зазор; при этом возрастает магнитное сопротивление и уменьшается магнитный поток (§ 5.1);

в) на пути потока устанавливается короткозамкнутый виток, который создает дополнительное магнитное сопротивление, уменьшающее магнитный поток (§ 5.3);

г) при номинальных токах выше 1000 А конструкционные детали изготавливаются из немагнитных материалов: алюминиевых сплавов, латуни, немагнитного чугуна и др.

Методика измерения активных потерь в аппаратах рассмотрена в [2.3].

В аппаратах переменного тока высокого напряжения помимо потерь в проводниковых и ферромагнитных материалах необходимо учитывать потери, Вт, в изоляции проводов и изолирующих деталях

$$P = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg}\delta, \tag{2.5}$$

где C — емкость изоляции, Ф; U — действующее значение напряжения, В; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции.

Изоляция аппарата нагревается за счет как этих потерь, так и потерь в токоведущей цепи.

2.3. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА ВНУТРИ НАГРЕТЫХ ТЕЛ И С ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Различают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

а) Теплопроводность. Теплопроводностью называется процесс передачи тепла от одной частицы тела к другой или от одного тела к другому, когда эти частицы или тела соприкасаются друг с другом. Теплопроводность в металлах осуществляется путем теплового движения электронов, а в остальных случаях — молекул. Теплопроводность характерна для передачи тепла в твердых телах. Необходимым условием теплопроводности является разность температур.

Математически процесс теплопроводности описывается уравнением Фурье

$$d^2\mathbf{Q} = -\mathbf{n}_0 \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial n} dS dt, \tag{2.6}$$

где $d^2\mathbf{Q}$ — количество тепла, передаваемого в направлении $\mathbf{n}_0$ за счет теплопроводности; $\mathbf{n}_0$ — единичный вектор, нор-

мальный к изотермической поверхности, направленный в сторону возрастания температуры; λ — коэффициент теплопроводности материала, через который идет передача тепла; Θ — температура среды; dS — поверхность, через которую передается тепло; dt — время, в течение которого проходит отдача тепла d^2Q. Изотермической называется поверхность, все точки которой имеют одинаковую температуру. Величина $\partial\Theta/\partial n$ называется градиентом температуры и характеризует скорость ее изменения в направлении n_0, перпендикулярном площадке dS. Коэффициент теплопроводности λ характеризует количество тепла, проходящего через единицу поверхности за время 1 с при $\partial\Theta/\partial n = 1\ °C \cdot м^{-1}$.

Из (2.6) следует

$$\lambda = \frac{\partial^2 Q}{-\frac{\partial\Theta}{\partial n} dS\, dt}. \qquad (2.7)$$

Таким образом, количество тепла d^2Q, проходящего через элементарную площадку dS за промежуток времени dt, пропорционально размеру площадки dS, промежутку времени dt и градиенту температуры $\partial\Theta/\partial n$.

Отрицательный знак правой части (2.6) обусловлен тем, что тепловая энергия распространяется от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой, т. е. в направлении, противоположном градиенту температуры.

Температурное поле может быть трехмерным. Поэтому при определении тепла, передаваемого в направлении n_0, берется частная производная температуры по координате n_0.

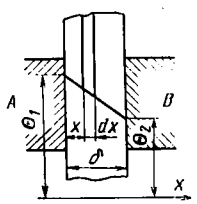


Рис. 2.5. К расчету перепада температуры в плоской стенке

В качестве примера определим распределение температуры в стенке толщиной δ, разделяющей две среды A и B с различными температурами Θ_1 и Θ_2 (рис. 2.5).

Преобразовав (2.6), получим количество тепла, проходящего через поверхность площадью 1 м^2 за время 1 с, называемое плотностью теплового потока:

$$\frac{d^2 Q}{dS\, dt} = -\lambda \frac{d\Theta}{dx} = \Phi_0. \qquad (2.8)$$

Проинтегрируем (2.8), считая $\lambda = \text{const}$,

$$\int_{\Theta_1}^{\Theta_2} -d\Theta = \Theta_1 - \Theta_2 = \Delta\Theta = \frac{\Phi_0 x}{\lambda}\Bigg|_0^{\delta} = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda}. \qquad (2.9)$$

Таким образом, падение температуры вдоль координаты x происходит по линейному закону.

Тепловой поток, проходящий за 1 с через всю поверхность стенки,

$$\Phi = \Phi_0 S. \qquad (2.10)$$

Из (2.9) и (2.10) получим

$$\Delta\Theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi\delta}{\lambda S} = \Phi R_т, \qquad (2.11)$$

где $R_т$ — термическое сопротивление стенки.

Уравнение (2.11) аналогично закону Ома для электрической цепи и называется тепловым законом Ома. Падение температурного потенциала равно произведению теплового потока на термическое сопротивление. Термическое сопротивление пропорционально длине пути потока δ, обратно пропорционально сечению этого пути и коэффициенту теплопроводности. Из (2.11) можно получить

$$\Phi = \Delta\Theta / R_т. \qquad (2.12)$$

Таким образом, количество тепла Φ, отводимого за время 1 с от одного тела к другому за счет теплопроводности, прямо пропорционально перепаду температуры $\Delta\Theta$ между ними и обратно пропорционально термическому сопротивлению $R_т$ того тела, через которое передается тепло.

Если тепловой поток проходит через ряд стенок с толщиной δ_i и коэффициентом теплопроводности λ_i, то

$$R_т = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} \delta_i/\lambda_i = \frac{1}{S}(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \ldots + \delta_n/\lambda_n). \qquad (2.13)$$

Коэффициенты теплопроводности различных материалов приведены в [2.1].

б) Конвекция. Конвекцией называется процесс передачи тепла путем перемещения частиц жидкости или газа. При естественной конвекции движение охлаждающего газа или жидкости происходит за счет разницы плотностей нагретых и холодных объемов газа или жидкостей. При искусственной конвекции охлаждающая среда приводится в движение с помощью вентиляторов или насосов.

Количество тепла, Вт, отдаваемого телом за счет конвекции,

$$\Phi_{кон} = \alpha(\Theta_2 - \Theta_1) S, \qquad (2.14)$$

где α — коэффициент теплоотдачи при конвекции, определяемый теплом, которое снимается за 1 с с поверхности в 1 м² при разности температур охлаждаемой поверхности и охлаждающей среды 1 °С, Вт/(м²·°С); Θ_2 — температура охлаждаемой поверхности, °С; Θ_1 — температура охлаждающей среды, °С; S — охлаждаемая поверхность, м².

Коэффициент теплоотдачи α является сложной функцией многих факторов, в том числе:

а) температуры, вязкости и плотности охлаждающей среды;

б) формы охлаждаемой поверхности и ее расположения относительно потока охлаждающей среды и поля тяготения;

в) скорости вынужденного движения охлаждающей среды;

г) температуры охлаждаемой поверхности.

В большинстве случаев значения α определяются эмпирически.

Количество тепла, отводимого за счет конвекции, нелинейно зависит от перепада температур, так как α также представляет собой нелинейную функцию этого перепада [1.4]. Ниже приводятся значения α, полученные опытным путем.

Для горизонтальных круглых проводников диаметром от 10 до 80 мм

$$\alpha = 3{,}5\,(10/d)^{1/4}(\Theta_2 - \Theta_1)^{0{,}25}.$$

Для плоской шины с большей гранью, расположенной вертикально,

$$\alpha = 1{,}5\,(\Theta_2 - \Theta_1)^{0{,}35}.$$

Для горизонтальной плоскости, обращенной нагретой поверхностью вверх,

$$\alpha = 3{,}25\,(\Theta_2 - \Theta_1)^{0{,}25}.$$

Для вертикальной плоскости в трансформаторном масле

$$\alpha = 43\,(\Theta_2 - \Theta_1)^{0{,}25}.$$

Для горизонтального цилиндра в трансформаторном масле

$$\alpha = 160\,(\Theta_2 - \Theta_1)^{0{,}3}.$$

Для вертикальной шероховатой стенки в потоке воздуха, движущегося со скоростью v, м/с,

$$\alpha = 6 + 4{,}2v.$$

Более точно коэффициент теплоотдачи рассчитывается с помощью теории подобия [1.4].

Рост мощности на единицу оборудования (генераторы до 1000 МВт при напряжении 15—20 кВ) вызывает увеличение номинальных токов аппаратов до 25—50 кА. При естественном охлаждении сечение токоведущих частей аппаратов настолько возрастает, что габаритные размеры аппаратов становятся неприемлемыми. В этом случае применяется жидкостное водяное охлаждение [3.2] и токоведущие элементы аппарата делаются полыми для прокачивания воды. При движении частицы воды могут двигаться параллельно стенкам канала (ламинарное движение) и хаотически, неупорядоченно (турбулентное движение). Наилучшая отдача тепла от труб с жидкостью происходит при турбулентном движении при относительно больших скоростях.

Следует отметить, что водяное охлаждение значительно усложняет конструкцию аппарата и его обслуживание и поэтому применяется только при больших токах.

в) Тепловое излучение. Часть тепла нагретое тело отдает в окружающее пространство путем излучения электромагнитных колебаний (ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей). Этот способ теплоотдачи называется тепловым излучением, лучеиспусканием или радиацией. Тепло, отдаваемое телом за счет теплового излучения, может быть определено с помощью уравнения Стефана — Больцмана

$$\Phi_{из} = c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] S, \qquad (2.15)$$

где T_1 — температура поверхности, окружающей нагретое тело, К; T_2 — температура тела, К (обычно за T_1 принимают температуру окружающей среды); $c_0 = 5{,}7 \cdot 10^4$ Вт·м$^{-2}$××К$^{-4}$ — излучательная способность абсолютно черного тела; ε — коэффициент теплового излучения (значения ε приведены в [2.1]).

Таким образом, тепло, отдаваемое телом при тепловом излучении, зависит от разности четвертых степеней абсолютных температур его нагретой поверхности и окружающих его тел.

Суммарное количество тепла, отдаваемое телом всеми видами теплообмена [см. (2.14), (2.15)], нелинейно зависит от температуры, что существенно затрудняет тепловые расчеты. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо предварительно оценить интенсивность всех видов теплообмена и вести расчет по тому из них, который преобладает. Например, для длинных шин теплопроводностью можно пренебречь и вести расчет только лучеиспускания и конвекции. Для проводников, погруженных в масло, рассчитывается только случай конвекции. Упрощенный расчет можно проводить по следующей методике.

Выразим тепло, отдаваемое в окружающее пространство в единицу времени (мощность), уравнением

$$\Phi = k_т S (\Theta_2 - \Theta_1) = k_т S\tau, \qquad (2.16)$$

где $\tau = \Theta_2 - \Theta_1$ — превышение температуры, °С; Θ_2—температура поверхности нагретого тела; Θ_1 — температура окружающей среды; $k_т$ — коэффициент теплообмена, включающий все виды охлаждения, $Вт \cdot м^{-2} \cdot °С^{-1}$,

$$k_т = \Phi/(S\tau) = f(\Theta_1, \Theta_2). \qquad (2.17)$$

Коэффициент $k_т$ является сложной функцией температуры и других физических параметров.

В диапазоне рабочих температур длительного режима ($\Theta_2 = 90 \div 120$ °С) значение $k_т$ меняется незначительно, и для приближенных расчетов (с точностью 15—20 %) его

Таблица 2.1

Коэффициенты теплообмена при естественной конвекции, Вт/(м².°С)

Поверхность охлаждения и ее характеристика	В воздухе	В масле
Горизонтальные круглые стержни из меди диаметром 10—60 мм	13—8,5	—
Плоские шины из меди, поставленные на ребро	6—9	—
Медные и алюминиевые горизонтальные коробчатые шины, охлаждающая поверхность которых принята равной их наружной поверхности	9—12,5	—
Чугунная или стальная поверхность, тонко шпаклеванная и лакированная	10—14	—
Любая лакированная поверхность	12—16	—
Фарфоровые цилиндры в баке с маслом	—	50—150
Обмотка с бумажной изоляцией	10—12,5	25—36
Пакет листовой стали	10—12,5	70—90

можно считать постоянным. При этом (2.16) является известной формулой Ньютона $\Phi = k_т S \tau$.

Коэффициент $k_т$ называют обобщенным коэффициентом теплообмена или просто коэффициентом теплообмена. Физически этот коэффициент определяет мощность, отдаваемую с единицы поверхности охлаждения при превышении температуры в 1 °С (1 Вт·м$^{-2}$·°С$^{-1}$ = 10^4 Вт·см$^{-2}$·°С$^{-1}$). Значения $k_т$ для различных элементов аппаратов приведены в [1.4]. В табл. 2.1 даны значения $k_т$ для наиболее часто встречающихся случаев.

Уравнение (2.16) позволяет определить τ по известным размерам тела и тепловому потоку, отдаваемому в окружающее пространство. Это уравнение широко применяется, особенно при тепловых расчетах в неустановившихся режимах. Следует отметить, что бóльшую точность обеспечивает раздельный учет конвекции и теплового излучения [2.1, 1.4].

2.4. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ НАГРЕВА

Процесс нагрева считается установившимся, если с течением времени температура частей аппарата не изменяется. Температура может считаться установившейся, если за 1 ч нагрева она возрастет не более чем на 1 °С. В установившемся режиме все выделяющееся тепло отдается в окружающее пространство. В противном случае часть тепла идет на нагрев аппарата и его температура изменяется.

а) Расчет сечения неизолированного проводника. Сопротивление круглого проводника

$$R = \frac{4\rho_0 (1 + \alpha_R \Theta_{ном}) l}{\pi d^2}, \qquad (2.18)$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление при 0 °С; d — диаметр проводника; l — его длина; α_R — температурный коэффициент сопротивления; $\Theta_{ном}$ — допустимая температура в номинальном режиме, °С.

Из (2.16) и (2.18) получим

$$\Phi = I^2 R = \frac{4 I^2 \rho_0 (1 + \alpha_R \Theta_{ном}) l}{\pi d^2} = k_т \pi d (\Theta_{ном} - \Theta_0) l, \qquad (2.19)$$

где Θ_0 — температура окружающей среды.

Из (2.19) следует

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 I^2 \rho_0 (1 + \alpha_R \Theta_{ном})}{\pi^2 k_т (\Theta_{ном} - \Theta_0)}}. \qquad (2.20)$$

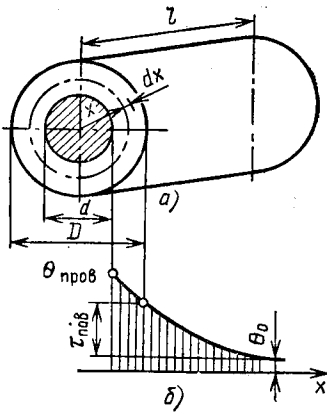


Рис. 2.6. К расчету перепада температуры в цилиндрическом слое изоляции

Выбрав d с некоторым запасом и рассчитав коэффициент добавочных потерь $k_{доб}$, уточняем

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I^2\rho_0(1+\alpha_R\Theta_{ном})k_{доб}}{\pi^2 k_т(\Theta_{ном}-\Theta_0)}}.$$

Для проводника прямоугольного сечения (шины)

$$R = \rho_0\frac{1+\alpha_R\Theta_{ном}}{ab}l, \qquad (2.21)$$

где a и b — стороны сечения шины.

Воспользовавшись (2.16) и (2.21), получим

$$ab(a+b) = \frac{I^2\rho_0(1+\alpha_R\Theta_{ном})}{2k_т(\Theta_{ном}-\Theta_0)}. \qquad (2.22)$$

Обозначив $m=a/b$, получим из (2.22)

$$b = \sqrt[3]{\frac{I^2\rho_0(1+\alpha_R\Theta_{ном})}{m(m+1)2k_т(\Theta_{ном}-\Theta_0)}}. \qquad (2.23)$$

Из конструктивных соображений и условий механической прочности обычно принимается $m=3\div10$.

Определив затем a, находят коэффициент добавочных потерь $k_{доб}$ и проводят проверку с учетом этого коэффициента.

б) Нагрев изолированных токоведущих частей. Рассмотрим нагрев круглого медного проводника, покрытого равномерным слоем изоляционного материала (рис. 2.6, *а*). Принимаем, что тепловой поток вдоль оси проводника отсутствует, а поверхностями равной температуры (изотермами) в нем являются цилиндры. В установившемся режиме вся мощность, выделяемая в проводнике, отдается в окружающую среду через внешнюю поверхность изоляции. Превышение температуры между этой поверхностью и окружающей средой

$$\tau_{псв} = \Theta_{пов.из} - \Theta_0.$$

Тепловой поток проводника создает на толщине изоляции перепад температуры $\Delta\Theta$. Тогда температура медной поверхности проводника

$$\Theta_{пров} = \Theta_{пов.из} + \Delta\Theta = \Theta_0 + \tau_{пов} + \Delta\Theta.$$

Превышение температуры поверхности изоляции может быть найдено из (2.16)

$$\tau_{пов} = \Phi/(k_т\pi Dl) = I^2Rk_{доб}/(k_т\pi Dl).$$

Для определения $\Delta\Theta$ воспользуемся уравнением Фурье (2.6) для случая передачи тепла теплопроводностью.

Для слоя изоляции с радиусом x можно написать

$$\Phi = -\lambda \frac{d\Theta}{dx} 2\pi x l, \tag{2.24}$$

где Φ — тепловой поток в единицу времени через боковую поверхность цилиндра $2\pi xl$; λ — коэффициент теплопроводности изоляционного материала; Θ — температура боковой поверхности с радиусом x.

Решим (2.24) относительно Θ:

$$\int_{\Theta_{\text{пров}}}^{\Theta_{\text{пов}}} d\Theta = \Theta_{\text{пов}} - \Theta_{\text{пров}} = -\int_{d/2}^{D/2} \frac{\Phi dx}{2\pi l \lambda x} = -\frac{\Phi}{2\pi l\lambda} \ln \frac{D}{d}.$$

Поскольку $\Theta_{\text{пров}} > \Theta_{\text{пов}}$, то

$$\Delta\Theta = \frac{\Phi}{2\pi l\lambda} \ln \frac{D}{d} = \Phi R_{\text{т}},$$

где $R_{\text{т}}$ — термическое сопротивление изоляции, равное

$$\left(1/2\,\pi l\lambda\right) \ln \frac{D}{d}.$$

Температура провода

$$\Theta_{\text{пров}} = \Theta_0 + \frac{\Phi}{k_{\text{т}} \pi D l} + \frac{\Phi}{2\pi l\lambda} \ln \frac{D}{d}. \tag{2.25}$$

Из (2.25) следует

$$\Theta_{\text{пров}} - \Theta_0 = \Phi \left(\frac{1}{k_{\text{т}} \pi D l} + \frac{1}{2\pi\, l\lambda} \ln \frac{D}{d} \right).$$

Результирующее термическое сопротивление

$$R_{\text{т,рез}} = \frac{\Theta_{\text{пров}} - \Theta_0}{\Phi} = \frac{1}{2\pi\, l\lambda} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{k_{\text{т}} \pi D l} = R_{\text{т}} + R_{\text{т}0}. \tag{2.26}$$

Таким образом, результирующее сопротивление равно сумме термического сопротивления изоляции $R_{\text{т}}$ и термического сопротивления $R_{\text{т}0}$ перехода от наружной поверхности изоляции к окружающей среде. На рис. 2.6, *б* показано изменение температуры Θ. На участке от $d/2$ до $D/2$ температура изменяется от $\Theta_{\text{пров}}$ до $\Theta_{\text{пов}}$. Перепад температуры $\Delta\Theta = \Theta_{\text{пров}} - \Theta_{\text{пов}} = \Phi R_{\text{т}}$. На участке $x = D/2$ до $x = \infty$ температура изменяется от $\Theta_{\text{пов}}$ до Θ_0. Перепад температуры $\Theta_{\text{пов}} - \Theta_0$ равен $\tau_{\text{пов}} = \Phi R_{\text{т}0}$.

в) Нагрев катушек. Тепловой поток проходит через неоднородное тело катушки — воздушные зазоры, межслоевую и витковую изоляцию и металл провода. В конечном счете тепло, выделяющееся в катушке (рис. 2.7), отдается через внешнюю цилиндрическую поверхность $2\pi r_2 h_1$

внутреннюю цилиндрическую поверхность $2\pi r_1 h$ и верхний и нижний торцы катушки. В результате тепловое поле катушки получается очень сложным. Для получения приближенного решения задачи вводится понятие эквивалентной теплопроводности и делаются следующие допущения [1.4]:

1. Тепловой поток проходит только через внутреннюю и внешнюю цилиндрические поверхности катушки и отсутствует на ее торцах. Это допущение справедливо в том случае, когда щеки каркаса катушки выполнены из толстых пластин гетинакса или текстолита или при большой длине катушки. При этом изотермические поверхности имеют вид концентрических цилиндров, ось которых совпадает с осью катушки.

2. Тепловые потери в катушке равномерно распределены по ее объему. В действительности потери по объему распределены неравномерно и наибольшие удельные потери имеют место в точках с более высокой температурой.

3. Тело катушки представляется однородным телом с эквивалентным коэффициентом теплопроводности $\lambda = \lambda_{эк}$. Коэффициент $\lambda_{эк}$ учитывает теплопроводность изоляции провода и наличие промежутков между витками, заполненных воздухом или пропиточным лаком.

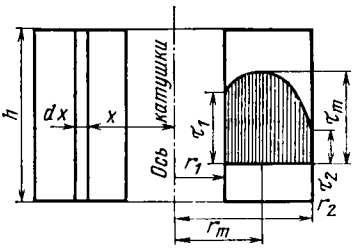


Рис. 2.7. К расчету температуры катушки

В установившемся тепловом режиме для любого элементарного объема проводника характерно, что количество тепла Q_1, поступающего из внутренней части, и количество тепла Q_2, выделившегося в этом объеме, равно количеству тепла Q_3, выходящего из этого объема,

$$Q_1 + Q_2 = Q_3. \qquad (2.27)$$

Воспользовавшись (2.8), можно написать

$$Q_1 = -2\pi x l \frac{\partial \tau}{\partial x};$$

$$Q_3 = -2\pi (x + dx) l \frac{\partial \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial x} dx\right)}{\partial x},$$

где x — радиус элементарного цилиндра; l — его длина.

Количество тепла, выделившегося в цилиндре с радиусом x и толщиной dx,

$$Q_2 = 2\pi x l \, dx \, P_0,$$

где P_0 — потери в единице объема, Вт/м³.

После подстановки и преобразования (2.27) получим дифференциальное уравнение нагрева. Решение этого уравнения приведено в [1.4] и имеет вид

$$\tau = -P_0 x^2/(4\lambda) + C_1 \ln x + C_2, \qquad (2.28)$$

где τ — превышение температуры точки с координатой x; C_1 и C_2 — постоянные интегрирования.

Определим постоянные интегрирования C_1 и C_2. Поскольку тепловой поток идет и через внутреннюю и через внешнюю поверхности охлаждения, то слой с максимальной температурой находится внутри катушки. Обозначим радиус изотермической поверхности с максимальным превышением температуры через r_m. Тогда при $x=r_m$ производная $\partial\tau/\partial x=0$ и $\tau=\tau_m$. Воспользовавшись (2.28) и условием, что при $x=r_m$ производная $\partial\tau/\partial x=0$, определим постоянную C_1, считая, что r_m известно,

$$C_1 = \frac{P_0^2}{2\lambda} r_m^2.$$

После подстановки C_1 в (2.28) получим

$$\tau = -\frac{P_0 x^2}{4\lambda} + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln x + C_2. \qquad (2.29)$$

Подставив в (2.29) сначала $x=r_1$, потом $x=r_2$, после вычитания второго уравнения из первого получим

$$\tau_1 - \tau_2 = -\frac{P_0}{4\lambda}\left(r_1^2 - r_2^2\right) + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln \frac{r_1}{r_2}. \qquad (2.30)$$

Здесь τ_1 и τ_2 — превышение температуры изотермических поверхностей с радиусами r_1 и r_2.

Если можно пренебречь теплом, отдаваемым магнитопроводу (электромагниты переменного тока, электромагниты, у которых катушка намотана на монолитный изоляционный каркас), то $r_m=r_1$; $\tau_m=\tau_1$, и (2.30) принимает вид

$$\tau_m = \tau_1 = \tau_2 + \frac{P_0}{2\lambda} r_1^2 \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{P_0}{4\lambda}\left(r_2^2 - r_1^2\right). \qquad (2.31)$$

Превышение температуры τ_2 определяется по (2.16). Если обмотка намотана непосредственно на магнитопровод и изоляция между ним и обмоткой имеет высокую теплопроводность, то значительное количество тепла передается в магнитопровод, который играет роль теплоотводящего радиатора. Расчет τ_m в этом случае осложняется. Для приближенных расчетов можно рекомендовать формулу из [3.2]

$$\tau_{у.ср} = \frac{I_0^2 R_0}{k_т S_{эк}\left(1 + \alpha_R \dfrac{I_0^2 R_0}{k_т S_{эк}}\right)},$$

где $\tau_{у.ср}$ — среднее установившееся превышение температуры; I_0 и R_0 — ток и сопротивление до включения при температуре окружающей среды; $S_{эк}$ — эквивалентная поверхность охлаждения; $k_т$ — коэффициент теплоотдачи; α_R — температурный коэффициент сопротивления.

Эквивалентная поверхность

$$S_{эк} = S_{вш} + \beta_1 S_{вт} + \beta_2 S_{торц},$$

где $S_{вш}$, $S_{вт}$ — внешняя и внутренняя поверхности катушки; $S_{торц}$ — площадь торцов; β_1, β_2 — эмпирические коэффициенты.

Для бескаркасных катушек контакторов и реле постоянного тока можно принять $\beta_2=0$; $\beta_1=0{,}9$. Для катушек, намотанных на стальную гильзу, $\beta_2=0$; $\beta_1=1{,}7$. Для катушек, намотанных непосредственно на магнитопровод, $\beta_2=0$; $\beta_1=2{,}4$.

Более подробно расчет катушек описан в [1.4].

В (2.31) используется $\lambda_{эк}$ — коэффициент теплопроводности однородного замещающего тела, эквивалентный коэффициенту теплопроводности катушки. Для катушки из круглого провода

$$\lambda_{эк} = 0{,}6\lambda_{п}\, d/(2\delta),$$

где d — диаметр провода без изоляции; δ — толщина изоляции; $\lambda_{п}$ — коэффициент теплопроводности изоляции проводника.

Для катушек, намотанных проводом ПЭВ-1, ПЭВ-2, $\lambda_{п}=0{,}15\div 0{,}2$ Вт/(м·°С). Данные по теплопроводности изоляции проводов, прокладок и др. приведены в [5.3]. Пример теплового расчета катушки дан в [2.3].

2.5. НАГРЕВ АППАРАТОВ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

а) Переходный процесс при нагреве и охлаждении. После включения аппарата температура его элементов не сразу достигает установившихся значений. Тепло, выделяемое в аппарате, частично отдается в окружающее пространство, частично идет на повышение его температуры. Количество тепла, отдаваемого в окружающее пространство, определим с помощью уравнения Ньютона (2.16)

$$P dt = k_т S\tau dt + C d\Theta, \qquad (2.32)$$

где P — мощность тепловых потерь в теле, Вт; C — теплоемкость тела, Вт·с, равная $C=cM$; c — удельная теплоемкость единицы массы, Вт·с/(кг·°С); M — масса тела, кг.

Первый член правой части (2.32) есть количество тепла, отдаваемого телом в окружающую среду за время dt; второй — количество тепла, воспринимаемого телом при изменении его температуры на $d\Theta$. При постоянстве темпе-

ратуры окружающей среды Θ_0, очевидно, $d\Theta = d\tau$, так как $\tau = \Theta - \Theta_0$.

Возможны три режима работы аппарата. Первый режим характеризуется постоянством подводимой к нему мощности

$$P = I_0^2 R_0 = \text{const}.$$

Этот случай встречается при последовательном включении аппарата в цепь и малом изменении его сопротивления R_0 с ростом температуры. При втором режиме ток через аппарат в процессе нагрева не меняется $I_0 = \text{const}$, так как его сопротивление значительно меньше сопротивления нагрузки и остальной части цепи ($Z_{\text{ап}} \ll Z_{\text{цепи}}$). Вследствие нагрева сопротивление токоведущей цепи аппарата изменяется.

Тогда мощность, подводимая к аппарату,

$$P = I_0^2 R = I_0^2 R_0 (1 + \alpha_R \Theta) = I_0^2 R_0 [1 + \alpha_R (\Theta_0 + \tau)].$$

При третьем режиме обмотка аппарата подключена к напряжению U источника бесконечной мощности. Обычно так включаются катушки контакторов, реле напряжения, промежуточных реле. В этом случае

$$P = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha_R \Theta)} = \frac{U^2}{R_0 [1 + \alpha_R (\Theta_0 + \tau)]}.$$

Если $P = \text{const}$, то решение (2.32) имеет вид

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T}), \qquad (2.33)$$

где τ_0 — превышение температуры в начале процесса ($t = 0$); τ_y — установившееся превышение температуры, $\tau_y = P/(k_\tau S)$; T — постоянная времени нагрева, равная $cM/(k_\tau S)$.

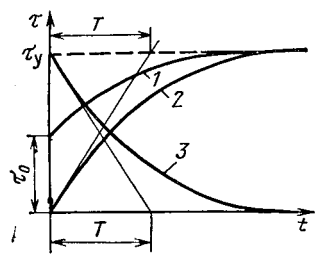


Рис. 2.8. Переходный процесс нагрева и охлаждения

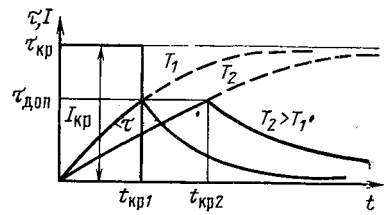


Рис. 2.9. Кривые нагрева и охлаждения при кратковременном режиме работы

Зависимость $\tau(t)$ изображена на рис. 2.8 (кривая *1*). При $\tau_0=0$ эта зависимость описывается кривой *2*. Очевидно, что чем больше T, тем медленнее происходит нагрев. В установившемся режиме все выделяемое тепло отдается в окружающую среду.

Проведем касательную в начале координат к кривой $\tau(t)$

$$\left.\frac{d\tau}{dt}\right|_{t=0} = \tau_y/T \text{ или } T = \tau_y \Big/ \left.\frac{d\tau}{dt}\right|_{t=0}.$$

Эта касательная отсекает на прямой $\tau=\tau_y$ отрезок, равный в выбранном масштабе постоянной времени нагрева T.

Предположив, что нагрев происходит без отдачи тепла в окружающее пространство, получим из (2.32)

$$Pdt = Cd\tau,$$

откуда

$$\tau = \frac{P}{C}t.$$

Но так как $P=k_\tau S\tau_y$, а $T=C/(k_\tau S)$, то

$$\tau = (\tau_y/T)\,t,$$

т. е. рост температуры описывается касательной к кривой $\tau(t)$ в начале координат.

При $t=T$ превышение температуры $\tau=\tau_y$. Таким образом, постоянная времени T есть время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающее пространство.

Рассмотрим условие, при котором можно не учитывать отдачу тепла в окружающую среду.

Если в (2.33) член $e^{-t/T}$ разложить в ряд, то при $\tau_0=0$ получим

$$\tau = \tau_y\left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{t}{T}\right)^3 + \ldots\right].$$

При $t/T<0{,}1$ с точностью не хуже 5 % можно учитывать только первый член. Тогда

$$\tau = \tau_y\, t/T.$$

Таким образом, если длительность нагрева не превышает 0,1 T, можно пренебречь отдачей тепла в окружающую среду.

Для второго описанного режима, когда мощность P меняется во времени, решение задачи рассмотрено в [3.2].

После отключения аппарата тепло, накопленное в процессе нагрева, отдается в окружающую среду. Энергетический баланс при охлаждении тела описывается уравнением

$$Cd\tau = -k_т S\tau dt, \tag{2.34}$$

решение которого относительно τ имеет вид

$$\tau = \tau_у e^{-t/T}. \tag{2.35}$$

Зависимость $\tau(t)$ при охлаждении изображена кривой *3* на рис. 2.8.

б) Нагрев при кратковременном режиме работы. Кратковременный режим работы аппарата характеризуется тем, что при включении температура его не достигает установившейся. После кратковременного нагрева аппарат отключается и его температура падает до значения температуры окружающей среды.

Типичные кривые нагрева и охлаждения изображены на рис. 2.9. Обычно длительность $t_{кр}$ прохождения тока $I_{кр}$ кратковременного режима выбирается так, чтобы превышение температуры токоведущих частей не превышало допустимого значения ($\tau \leqslant \tau_{доп}$).

Если принять, что $\tau_{кр}$ — установившееся превышение температуры в случае бесконечно длительного прохождения тока $I_{кр}$, то из (2.33) можно найти время, по истечении которого превышение температуры будет равно допустимому:

$$\tau_{доп} = \tau_у \left(1 - e^{-t_{кр}/T}\right),$$

откуда

$$t_{кр} = T \ln \frac{1}{1 - \tau_{доп}/\tau_{кр}}. \tag{2.36}$$

Из (2.36) следует, что чем больше постоянная времени нагрева T, тем больше время нахождения аппарата под током. После времени $t_{кр1}$ и $t_{кр2}$ аппарат отключается и охлаждается до температуры окружающей среды.

Найдем связь между допустимым током $I_{дл}$ длительного режима и допустимым током $I_{кр}$ кратковременного режима. Воспользовавшись (2.33) и выразив $\tau_{доп}$ и $\tau_{кр}$ через ток, получим

$$\tau_{доп} = I^2_{дл} R/(k_т S); \quad \tau_{кр} = I^2_{кр} R/(k_т S);$$

$$I_{дл}^2 = I_{кр}^2\left(1 - e^{-t_{кр}/T}\right), \qquad (2.37)$$

откуда

$$I_{кр} = I_{дл}\Big/\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}. \qquad (2.38)$$

Для характеристики кратковременного режима вводится понятие коэффициента перегрузки $p = I_{кр}/I_{дл}$, который показывает, во сколько раз может возрасти допустимая нагрузка по току при кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом:

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}}. \qquad (2.39)$$

Анализ (2.38) показывает, что при неизменном значении $t_{кр}$ допустимый ток кратковременного режима $I_{кр}$, а следовательно, и коэффициент перегрузки p растут с увеличением постоянной времени. В связи с этим в аппаратах, работающих в кратковременном режиме, рекомендуется увеличивать постоянную времени, что позволяет повысить нагрузку по току. Увеличение постоянной времени достигается в основном за счет увеличения массы материала, участвующего в процессе нагрева.

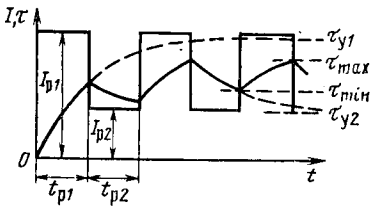


Рис. 2.10. Кривые нагрева при перемежающемся режиме работы

Следует отметить, что при $t = 4T$ допустимое превышение температуры достигает $0{,}98\,\tau_у$. Поэтому при $t > 4T$ режим можно считать длительным.

в) Перемежающийся и повторно-кратковременный режимы работы. При перемежающемся режиме проходящий через аппарат ток циклически меняется, не спадая до нулевого значения (рис. 2.10). В течение времени работы $t_{р1}$ через аппарат проходит неизменный ток $I_{р1}$. Установившееся превышение температуры при этом токе равно $\tau_{у1}$. В течение времени $t_{р2}$ через аппарат проходит неизменный ток $I_{р2}$. Этому току соответствует установившееся превышение температуры $\tau_{у2}$.

Поскольку $I_{р1} > I_{р2}$, то в течение времени $t_{р2}$ аппарат охлаждается.

Через некоторое время максимальные τ_{max} и минималь-

ные τ_{min} превышения температуры соседних циклов станут одинаковыми. Наступит так называемый квазистационарный режим. Для этого режима в конце интервала t_{p1} превышение температуры достигает τ_{max}. Воспользовавшись (2.33), получим

$$\tau_{max} = \tau_{y1}\left(1 - e^{-t_{p1}/T}\right) + \tau_{min}\, e^{-t_{p1}/T}. \qquad (2.40)$$

В течение времени t_{p2} аппарат охлаждается, и его превышение температуры описывается уравнением

$$\tau = \tau_{max}\, e^{-t/T} + \tau_{y2}\left(1 - e^{-t/T}\right);$$

$$t = t_{p2}; \quad \tau = \tau_{min};$$

$$\tau_{min} = \tau_{max}\, e^{-t_{p2}/T} + \tau_{y2}\left(1 - e^{-t_{p2}/T}\right). \qquad (2.41)$$

Подставив τ_{min} из (2.41) в (2.40) и решив (2.40) относительно τ_{max}, получим

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{y1}\left(1 - e^{-t_{p1}/T}\right) + \tau_{y2}\left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/T}\right)}{1 - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/T}}. \qquad (2.42)$$

Значение τ_{max} не должно превышать максимально допустимое превышение температуры $\tau_{доп}$. Выразим установившиеся превышения температуры через соответствующие токи длительных режимов:

$$\tau_{y1} = I_{p1}^2 R/(k_т S); \qquad (2.43)$$

$$\tau_{y2} = I_{p2}^2 R/(k_т S); \qquad (2.44)$$

$$\tau_{доп} = I_{дл}^2 R/(k_т S), \qquad (2.45)$$

где $I_{дл}$ — допустимый эквивалентный ток длительного режима. Из (2.42) — (2.45) следует

$$I_{дл} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2\left(1 - e^{-t_{p1}/T}\right) + I_{p2}^2\left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/T}\right)}{1 - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/T}}}. \qquad (2.46)$$

Частным случаем перемежающегося режима является повторно-кратковременный режим, при котором $I_{p2}=0$. Отрезок времени t_{p2} называется временем паузы $t_п$. Поскольку $I_{p2}=0$, то $\tau_{y2}=0$. Обозначив $I_р=I_{p1}$, из (2.46) получим

$$I_{дл} = I_р \sqrt{\frac{1 - e^{-t_р/T}}{1 - e^{-(t_р+t_п)/T}}}. \qquad (2.47)$$

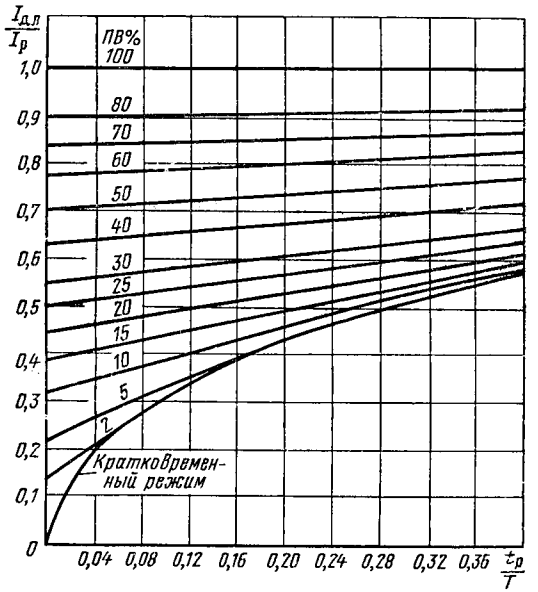


Рис. 2.11. Отношение $I_{дл}/I_р$ при изменении $ПВ_{\%}$ и $t_р/T$

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения ПВ или $ПВ_{\%}$:

$$ПВ_{\%} = ПВ \cdot 100 = \frac{t_р}{t_р + t_п} 100 = \frac{t_р}{t_ц} 100, \qquad (2.48)$$

где $t_ц = t_р + t_п$ — длительность цикла. С учетом (2.48) коэффициент перегрузки по току найдем из (2.47):

$$p = \frac{I_р}{I_{дл}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-t_р \cdot 100/(T \cdot ПВ\%)}}{1 - e^{-t_р/T}}}. \qquad (2.49)$$

При неизменном значении $ПВ_{\%}$ коэффициент перегрузки по току p и ток $I_р$ зависят от отношения $t_р/T$. Эта зависимость показана на рис. 2.11. Например при $ПВ_{\%} = 10$ % и $t_р/T = 0{,}04$ отношение $I_{дл}/I_р = 0{,}34$, а коэффициент перегрузки $p = 2{,}94$. Если $t_р/T = 0{,}4$, то отношение $I_{дл}/I_р$ возрастает до 0,57, а коэффициент p падает до 1,75. Таким образом, при возрастании отношения $t_р/T$ тепловая нагрузка аппарата увеличивается, а коэффициент перегрузки по току уменьшается.

2.6. НАГРЕВ АППАРАТОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

В электрических аппаратах токи КЗ могут в 10—20 раз превышать токи длительного режима. Для уменьшения температуры проводников длительность прохождения токов КЗ ограничивается защитными средствами до 4—5 с. С учетом этой длительности допустимая температура проводников при КЗ значительно выше, чем в длительном режиме. Так, для медных проводников с изоляцией класса А эта температура равна 250 °С. Поскольку длительность КЗ существенно меньше постоянной времени нагрева токоведущей цепи, составляющей минуты, можно считать процесс нагрева адиабатическим и что все тепло расходуется на повышение температуры проводника. В этом случае энергетический баланс проводника с сопротивлением R и массой M выражается уравнением

$$I^2 R dt = cMd\Theta. \tag{2.50}$$

Температура проводников при КЗ может достигать больших значений (300 °С). Поэтому необходимо учитывать изменение как сопротивления проводника R, так и удельной его теплоемкости c от температуры. С достаточной степенью точности изменение сопротивления проводника от температуры описывается линейным уравнением

$$R = k_{\text{доб}} \rho_0 \frac{l}{q} (1 + \alpha_R \Theta), \tag{2.51}$$

где $k_{\text{доб}}$ — коэффициент добавочных потерь в проводнике; ρ_0 — его удельное сопротивление при 0 °С; q и l — сечение и длина проводника.

Зависимость удельной теплоемкости от температуры может быть выражена как

$$c = c_0 (1 + \beta\Theta), \tag{2.52}$$

где c_0 — удельная теплоемкость проводника при 0 °С; β — температурный коэффициент теплоемкости.

Выразим массу M через плотность γ, сечение q и длину l проводника:

$$M = \gamma l q.$$

После подстановки (2.51) и (2.52) в (2.50) и упрощения получим

$$\frac{I^2}{q^2} dt = \frac{c_0 \gamma (1 + \beta\Theta)}{k_{\text{доб}} \rho_0 (1 + \alpha_R \Theta)} d\Theta. \tag{2.53}$$

Произведем интегрирование правой и левой частей уравнения (2.53):

$$\int_0^t \frac{I_к^2}{q^2}\,dt = \int_{\Theta_{ном}}^{\Theta_к} \frac{c_0\gamma(1+\beta\Theta)}{k_{доб}\rho_0(1+\alpha_R\Theta)}\,d\Theta, \qquad (2.54)$$

где $t_к$ — длительность КЗ; $I_к$ — действующее значение тока КЗ; $\Theta_{ном}$ — температура проводника при длительном номинальном токе до начала КЗ; $\Theta_к$ — температура проводника при КЗ к моменту времени $t_к$.

Примем, что действующее значение I неизменно во времени. В дальнейшем будет показано, что полученные формулы могут быть использованы и при изменяющемся действующем значении I. После интегрирования получим

$$\frac{I_к^2}{q^2}\,t_к = J_к^2\,t_к = A_{\Theta_к} - A_{\Theta_{ном}}, \qquad (2.55)$$

где $J_к$ — плотность тока; $A_{\Theta к}$ и $A_{\Theta ном}$ — значения интеграла правой части (2.54) при верхнем $\Theta_к$ и нижнем $\Theta_{ном}$ пределах интегрирования. На рис. 2.12 приведены кривые $\Theta = f(A_\Theta)$ для различных материалов.

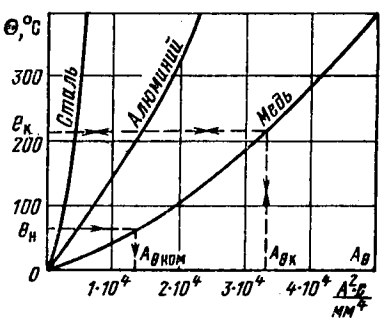


Рис. 2.12. К определению температуры проводников при КЗ

Допустимая температура проводника при КЗ $\Theta_к$ и при номинальном токе $\Theta_{ном}$ выбирается с учетом его свойств и его изоляции. С помощью рис. 2.12 находятся значения $A_{\Theta к}$ и $A_{\Theta ном}$, соответствующие температуре $\Theta_к$ и $\Theta_{ном}$. Зная J^2t, с помощью (2.55) можно при данных t и I определить сечение проводника q, либо при известных t и q найти допустимый ток КЗ. Если известен допустимый ток КЗ I_1 при времени $t_{к1}$, то допустимый ток при времени $t_{к2}$

$$I_2 = I_1\sqrt{\frac{t_{к1}}{t_{к2}}}. \qquad (2.56)$$

Уравнение (2.56) не учитывает теплоотдачу в окружающую среду и поэтому справедливо при длительности КЗ не более 10 с.

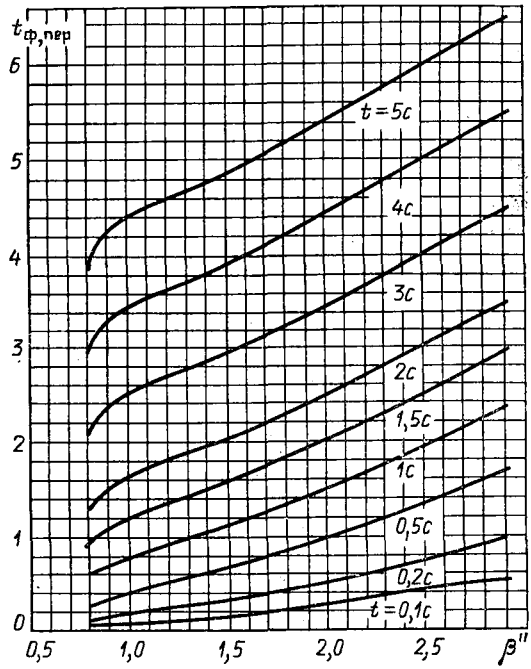


Рис. 2.13. К определению фиктивного времени $t_{ф,пер}$ для периодической составляющей тока КЗ

Если для материала проводника нет кривых, аналогичных рис. 2.12, то при $\beta \ll \alpha_R$ расчет производят по уравнению

$$J^2 t = \frac{c_0 \gamma_0}{\alpha_R \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha_R \Theta_к}{1 + \alpha_R \Theta_{ном}}. \qquad (2.57)$$

Физические свойства применяемых в аппаратах проводниковых материалов описаны в [8.1].

При КЗ непосредственно вблизи генераторов из-за переходных процессов ток КЗ, протекающий через аппарат, меняется. В этом случае расчет ведется по установившемуся значению тока КЗ I_∞. Время прохождения этого тока принимается равным фиктивному времени $t_ф$, при котором количество тепла, выделяющегося при прохождении тока I_∞, равно количеству тепла, выделяющегося при прохождении реального тока за действительное время его протекания.

Фиктивное время для периодической составляющей тока КЗ $t_{ф,пер}$ находится по кривым на рис. 2.13. Для данного генератора определяют отношение $\beta''=I''/I_\infty$, где I'' — действующее значение тока в начале КЗ.

Зная действительное время прохождения тока $t_к=t$ и β'', находят $t_{ф,пер}$. Фиктивное время для апериодической составляющей тока может быть найдено по упрощенной формуле [1.3]

$$t_{ф,апер}=0{,}005\,(\beta'')^2. \qquad (2.58)$$

Фиктивное время $t_ф=t_{ф,пер}+t_{ф,апер}$.

2.7. ДОПУСТИМАЯ ТЕМПЕРАТУРА РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Предельные температуры элементов аппаратов определяются свойствами примененных проводниковых, изоляционных и конструктивных материалов, длительностью температурных воздействий и назначением аппарата. В приложении 1 приведена нагревостойкость изоляционных материалов по ГОСТ 8865—87.

В большинстве случае аппараты рассчитываются для работы на высоте не более 1000 м над уровнем моря. С ростом высоты падает плотность воздуха, в связи с чем ухудшаются условия охлаждения. На высоте 3000 м токовая нагрузка аппаратов снижается на 4, а при высоте 6000 м — на 10 %.

Температура любого элемента аппарата в длительном режиме складывается из температуры окружающей среды Θ_0 и значения τ:

$$\Theta=\Theta_0+\tau,$$

где τ — превышение температуры данного элемента над температурой окружающей среды.

Согласно ГОСТ 403-73 и 8024-84 наибольшая температура окружающей среды принята 40 °С.

Если $\Theta_0>40$ °С, то токовая нагрузка аппарата должна быть снижена таким образом, чтобы предельные температуры находились в соответствии с ГОСТ. Это достигается уменьшением значения превышения температуры τ. Допустимый ток при $\Theta_0\neq40$ °С

$$I_{доп}=I_{ном}\sqrt{\frac{\Theta_{доп}-\Theta_0}{\Theta_{доп}-40\,°C}}. \qquad (2.59)$$

Если $\Theta_0 < 40\,^\circ C$, то токовая нагрузка аппарата может быть увеличена в соответствии с (2.59) так, чтобы предельные температуры были в соответствии с ГОСТ. Допустимые предельные значения температуры различных элементов аппаратов приведены в приложении 2 и 3.

Длительность и частота появлений КЗ достаточно малы. Поэтому допустимые температуры при КЗ в 2—4 раза выше, чем при длительном режиме. Согласно ГОСТ 687-78 предельные значения температуры при КЗ не должны превышать 200 °С для алюминиевых проводников, 250 °С для проводников из меди и ее сплавов, соприкасающихся с органической изоляцией или маслом, и 300 °С для проводников из меди и ее сплавов, не соприкасающихся с органической изоляцией или маслом. Способность аппарата выдерживать кратковременное тепловое действие тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе, называется термической стойкостью.

Токоведущие элементы аппарата, рассчитанные для длительного режима, должны быть проверены на термическую стойкость при КЗ с помощью (2.55) и кривых на рис. 2.12. При расчете берется наиболее тяжелый случай — к моменту начала КЗ элемент нагрет длительным током до предельно допустимой температуры номинального режима.

Поскольку ток термической стойкости зависит от длительности его прохождения, то термическая стойкость относится к определенному времени. Ток термической стойкости обычно относят ко времени 1; 3; 5 и 10 с в зависимости от параметров аппарата. Связь между токами термической стойкости для различных времен согласно (2.56) выражается равенством

$$I_1^2 \cdot 1 = I_3^2 \cdot 3 = I_5^2 \cdot 5 = I_{10}^2 \cdot 10.$$

Способы экспериментального определения температуры элементов аппаратов рассмотрены в [2.3].

2.8. ПРИМЕР ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ АППАРАТОВ

Определить длительный ток через токоведущий элемент в виде медного стержня $d = 0{,}035$ м. Наружная изоляция выполнена многослойной из хлопчатобумажной ленты, пропитанной глифталевым лаком (класс изоляции А). Толщина изоляции 10^{-3} м. Найти также допустимый ток КЗ при длительности его протекания 5 с. Частота тока 50 Гц.

Температура на поверхности стержня (проводника) согласно (2.25)

$$\Theta_{\text{пров}} = \Theta_0 + \frac{\Phi}{k_T \pi D l} + \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d};$$

$$\Phi = I^2 R k_{\text{доб}} = (\Theta_{\text{пров}} - \Theta_0) \frac{2\pi k_{\text{т}} D l \lambda}{2\lambda + k_{\text{т}} D \ln \frac{D}{d}} = (\Theta_{\text{пров}} - \Theta_0) \frac{1}{R_{\text{т,рез}}}.$$

Расчет проведем для единицы длины стержня:

$$I = \sqrt{\frac{(\Theta_{\text{пров}} - \Theta_0) 2\pi k_{\text{т}} D \lambda}{k_{\text{доб}} R \left(2\lambda + k_{\text{т}} D \ln \frac{D}{d}\right)}}.$$

Поскольку изоляция относится к классу А, то температура провода на поверхности $\Theta_{\text{пров}} = 105$ °С. Наибольшее значение $\Theta_0 = 40$ °С. Коэффициент теплообмена $k_{\text{т}} = 11 \div 13$ Вт/(м²·°С). Удельная теплопроводность пропитанной хлопчатобумажной изоляции $\lambda = 0{,}114$ Вт/(м·°С) [5.3].

Коэффициент добавочных потерь $k_{\text{доб}}$ определим с помощью рис. 2.1.

Удельное сопротивление ρ при температуре 105 °С

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_R \Theta) = 1{,}55 \cdot 10^{-8} (1 + 0{,}004 \cdot 105) = 2{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом·м}.$$

$$\text{Аргумент } \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{=} \cdot 10^7}} = 2{,}36, \text{ тогда } k_{\text{доб}} = 1{,}118.$$

Сопротивление единицы длины стержня на постоянном токе

$$R_{=} = \frac{\rho}{q} \frac{2{,}2 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{\pi (3{,}5)^2 \cdot 10^{-4}} = 0{,}23 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$I = \sqrt{\frac{(105 - 40) \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 12\,(0{,}035 + 0{,}002) \cdot 0{,}114}{1{,}118 \cdot 0{,}23 \cdot 10^{-4} \left(0{,}114 \cdot 2 + 12 \cdot 0{,}037 \ln \frac{0{,}037}{0{,}035}\right)}} = 1690 \text{ А}.$$

При отсутствии изоляции $D = d$ и допустимый ток равен 1760 А.

В данном случае отдача тепла с наружной поверхности происходит в основном за счет излучения и конвекции. Уточним значение допустимого тока для неизолированного провода, учитывая раздельно эти виды теплоотдачи.

Тепло, отдаваемое излучением на длине 1 м,

$$\Phi_{\text{из}} = c_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_2^4}{1000}\right) - \left(\frac{T_1^4}{1000}\right)\right] S;$$

$$T_2 = 105 + 273 = 378 \text{ К}; \quad T_1 = 40 + 273 = 317 \text{ К};$$

$$c_0 = 5{,}7 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м²·К)};$$

$\varepsilon = 0{,}78$ (для окисленной меди [2.1]);

$$S = \pi d l = \pi \cdot 0{,}035 \cdot 1 = 0{,}11 \text{ м}^2 = 1100 \text{ см}^2;$$

$$\Phi_{\text{из}} = 5{,}7 \cdot 0{,}78 \left[\left(\frac{378^4}{1000}\right) - \left(\frac{317^4}{1000}\right)\right] 0{,}11 \cdot 10^4 = 49 \text{ Вт/м};$$

$$\Phi_к = 3{,}5\cdot10^{-4}\left(\frac{1}{d}\right)^{0{,}25}(\Theta_{пров}-\Theta_0)^{1{,}25}S =$$

$$= 3{,}5\cdot10^{-4}\left(\frac{1}{3{,}5}\right)^{0{,}25}(105-40)^{1{,}25}\cdot1100 = 46{,}3 \text{ Вт/м}.$$

Полная мощность, отдаваемая с единицы длины стержня,

$$I^2 k_{доб} R = \Phi_{из} + \Phi_{коп} = 49 + 46{,}3 = 95{,}3 \text{ Вт/м};$$

$$I = \sqrt{\frac{\Phi_{из}+\Phi_{кон}}{k_{доб}R}} = \sqrt{\frac{95{,}3}{1{,}18\cdot0{,}23\cdot10^{-4}}} = 1860 \text{ А}.$$

Таким образом, расчет по формуле Ньютона дает результат (1690 А), который на 5,4 % ниже результата по более точным формулам (1860 А).

Определение допустимого тока КЗ:

$$k_{доб}\frac{I^2}{q^2}t = A_{\Theta_к} - A_{\Theta_{ном}}; \qquad \Theta_к = 250\ °C; \qquad \Theta_{ном} = 105\ °C.$$

Используя рис. 2.12, получаем

$$A_{\Theta_к} = 3{,}65\cdot10^4; \qquad A_{\Theta_{ном}} = 2\cdot10^4;$$

$$\Theta_{ср} = \frac{\Theta_{ном}+\Theta_к}{2} = 177{,}5\ °C \text{ при } \Theta_{ср} = 177{,}5\ °C; \quad k_д = 1{,}1;$$

$$I = \sqrt{\frac{(A_{\Theta_к} - A_{\Theta_{ном}})q^2}{k_д t}} = \sqrt{\frac{(3{,}65-2)\ 10^4\cdot960^2}{1{,}1\cdot5}} = 51\ 500 \text{ А}.$$

Глава третья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическим контактом называется соединение двух проводников, позволяющее проводить ток между ними. Соприкасающиеся проводники называются контактами или контакт-деталями.

Как ни тщательно обработаны поверхности соприкосновения контактов, электрический ток проходит между ними только в отдельных точках, в которых эти поверхности касаются, так как получить абсолютно гладкую поверхность практически невозможно. Примерная картина сопрокосновения контактов показана на рис. 3.1. Благодаря нажатию P одного контакта на другой вершины выступов деформируются и образуются площадки действительного касания

контактов. Рассмотрим процесс перехода тока из одного контакта в другой при касании двух цилиндрических контактов по торцам. Положим, что имеется только одна площадка касания, имеющая форму круга с радиусом a (рис. 3.2, $а$). Радиус a при пластической деформации можно найти с помощью формулы

$$\pi a^2 = P_{\text{конт}}/\sigma, \tag{3.1}$$

где $P_{\text{конт}}$ — сила контактного нажатия, Н; σ — временное сопротивление на смятие материала контактов, Н/м^2.

В результате стягивания линий тока к площадке касания их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления. Сопротивление в области площади касания, обусловленное явлениями стягивания линий тока, называется переходным сопротивлением стягивания контакта $R_{\text{ст}}$.

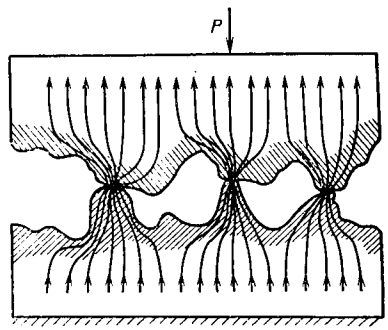


Рис. 3.1. Соприкосновение поверхностей контактов

Учитывая, что область стягивания линий тока мала по сравнению с размерами контакта, реальные контакты можно заменить полубесконечными телами с удельным сопротивлением ρ. Для двух полубесконечных тел, контактирующих по одной круглой площадке касания, картина линий тока и электрических потенциалов φ представлена на рис. 3.2, $б$.

Эквипотенциальные поверхности являются полуэллипсоидами вращения, линии тока — гиперболами с общим фокусом. Для такой идеализированной картины переходное сопротивление определяется выражением [1.4]

$$R_{\text{ст}} = \rho/(2a). \tag{3.2}$$

С точностью до 5 % эта формула справедлива, если диаметр контакта превосходит в 15 и более раз диаметр площадки касания. В большинстве практических случаев последнее условие соблюдается, так как размеры площадки касания обычно не превосходят долей миллиметра.

Из (3.1) и (3.2)

$$R_{ст} = \frac{\rho\sqrt{\pi\sigma}}{2\sqrt{P_{конт}}} = \frac{k_1}{P_{конт}^{1/2}}. \qquad (3.3)$$

Таким образом, переходное сопротивление, обусловленное стягиванием линий тока, пропорционально удельному сопротивлению материала контакта, корню квадратному из временного сопротивления на смятие этого материала σ и обратно пропорционально корню квадратному из силы контактного нажатия $P_{конт}$. С ростом контактного нажатия.

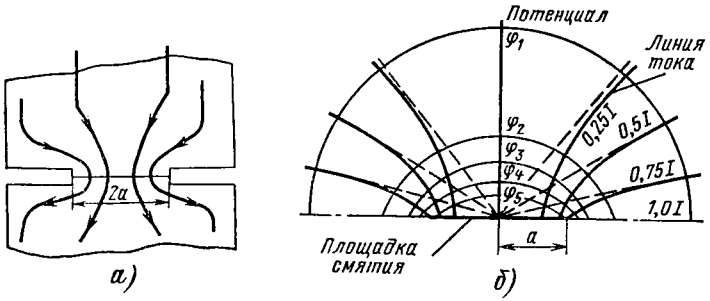


Рис. 3.2. Идеализированная картина растекания тока в точечном контакте

переходное сопротивление уменьшается (кривая *1* на рис. 3.3). Следует отметить, что при уменьшении нажатия (кривая *2*) зависимость $R_{ст}(P_{конт})$ идет ниже из-за наличия остаточных деформаций контактирующих выступов. При многократном замыкании и размыкании контактов кривые *1* и *2* не повторяют друг друга, так как в каждом случае касание происходит в различных точках. Вместо кривых *1* и *2* получается ограниченная ими область.

При упругой деформации контактирующих выступов показатель степени $P_{конт}$ в (3.3) равен 1/3.

Ниже приводятся полученные экспериментально значения коэффициента k_1 для одноточечных только что зачищенных контактов [3.1].

Материал контактов	Для сильноточных контактов, 10^{-4} $Н^{1/2}$, Ом	Для слаботочных контактов (реле) $Н^{1/2}$, Ом
Медь	3,16	0,014—0,0175
Серебро	1,58	0,006
Олово	15,8	—
Латунь	21,2	—
Сталь	24	—
Алюминий	5,05	—

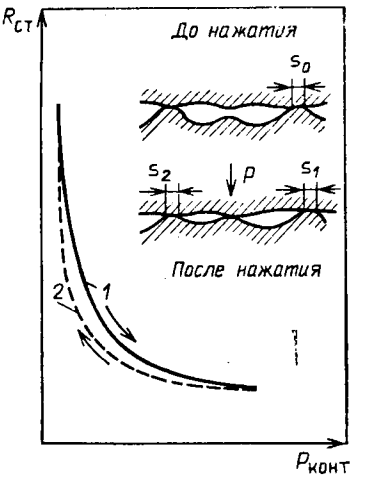


Рис. 3.3. Зависимость переходного сопротивления от контактного нажатия

Одноточечный контакт применяется в основном только при малых токах (до 20 А). При больших токах (100 А и более) применяется многоточечный контакт. В многоточечном контакте ток проходит через несколько контактных переходов, соединенных параллельно. Поэтому его переходное сопротивление при неизменном нажатии меньше, чем у одноточечного контакта. Однако нажатие в каждой контактной площадке уменьшается. Количество контактных переходов увеличивается с ростом нажатия по весьма сложному закону. Переходное сопротивление многоточечного контакта выражается уравнением, полученным экспериментально:

$$R_{ст} = k/P^m_{конт}, \qquad (3.4)$$

где $m = 0{,}7 \div 1$; k — постоянная, зависящая от конструкции контакта.

Экспериментальные формулы для определения $R_{ст}$ контактов, применяемых в аппаратах высокого напряжения, приведены в [3.1].

Сопротивление $R_{ст}$ зависит и от обработки поверхности. При шлифовке поверхность выступов более пологая с большой площадью. Смятие таких выступов возможно только при больших силах нажатия. Поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Переходное сопротивление контактов обусловлено не только явлением стягивания линий тока. Контактирующие поверхности покрыты адсорбированными молекулами газа, в котором располагались контакты до их замыкания. Очень часто молекулы газа вступают в химическую реакцию с материалом контактов, в результате чего на их поверхности могут возникнуть пленки с высоким удельным сопротивлением (до 10^4 Ом·м). Таким образом, результирующее переходное сопротив-

ление контактов $R_{конт}$ может быть представлено как сумма сопротивления $R_{ст}$ и сопротивления пленок $R_{пл}$:

$$R_{конт} = R_{ст} + R_{пл}.$$

Влияние пленок в значительной степени зависит от радиуса площадки a. При $a \geqslant 10^{-3}$ см влиянием пленок можно пренебречь. При $a = 10^{-4}$ см сопротивление пленок в 10 раз может превышать сопротивление $R_{ст}$. При $a = 10^{-4} \div 10^{-3}$ см величины $R_{ст}$ и $R_{пл}$ соизмеримы. Поэтому пленки особенно опасны для контактов на малые токи, когда силы нажатия и размер пятна a малы. Процесс образования пленки начинается сразу после соприкосновения зачищенной поверхности контактов с окружающим их воздухом. Переходное сопротивление при этом может возрасти в десятки тысяч раз. В связи с этим контакты на малые токи (малые нажатия) изготовляются из благородных металлов, не поддающихся окислению (золото, платина и др.). Обычно экспериментальные исследования и расчет переходного сопротивления ведутся для свежезачищенных контактов.

В сильноточных контактах пленка разрушается либо благодаря большим нажатиям, либо за счет проскальзывания одного контакта относительно другого.

В процессе работы переходное сопротивление контактов не остается постоянным. Под воздействием кислорода, других агрессивных газов, повышенной температуры интенсивность образования пленки растет. При этом переходное сопротивление контакта, падение напряжения на нем и его температура возрастают. При определенных значениях напряжений и температуры происходит электрический пробой пленки, после чего сопротивление контакта падает. Это явление называется фриттингом.

Для защиты контактов от воздействия окружающей среды они могут быть размещены в герметичном баллоне с инертным газом. Эти контакты получили название герконов (гл. 11).

При прохождении тока через область стягивания его линий контакт нагревается. Согласно [3.1] превышение температуры в области стягивания $\Delta\tau_{конт}$ может быть найдено приближенно

$$\Delta\tau_{конт} = U^2_{конт}/(8\lambda\rho), \qquad (3.5)$$

где $U_{конт}$ — падение напряжения на переходном сопротивлении, В, равное $IR_{ст}$; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); ρ — удельное электрическое сопротивление материала контактов, Ом·м.

Наибольшую температуру имеет площадка касания. По

мере удаления от нее температура контакта быстро падает. Протяженность области стягивания невелика и составляет $(5 \div 6)a$.

Рассмотрим процесс нагрева точечного торцевого контакта (рис. 3.4). Обозначим через P мощность тепловых потерь в различных точках контакта. Ток I, проходя по телу контакта, нагревает его. Тепло $P_1 = (1/2) I^2 R_к$ входит в торец контакта. Одновременно через боковую поверхность тепло отдается в окружающее пространство. При установившемся режиме тепло, которое входит в элемент толщиной dx, равно теплу, которое из него выходит:

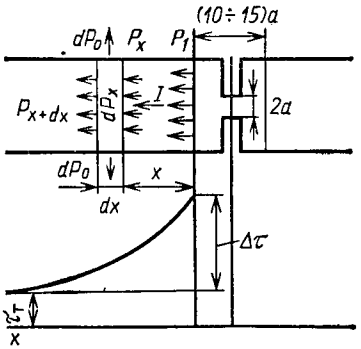


Рис. 3.4. К расчету температуры контактов

$$P_x + dP_x = dP_0 + P_{x+dx}, \tag{3.6}$$

где $P_x = -\lambda \dfrac{d\Theta}{dx} q$ — тепло, которое подошло к элементу справа; $dP_x = I^2 \rho \dfrac{dx}{q}$ — тепло, которое выделяется в этом элементе; q — сечение контакта; $dP_0 = k_т p (\Theta - \Theta_0) dx$ — тепло, отдаваемое с боковой поверхности; p — периметр сечения контакта; $dP_{x+dx} = -\lambda \dfrac{d\Theta}{dx}_{x+dx} q$ — тепло, которое выходит из элемента в направлении оси x.

Введем $\tau = \Theta - \Theta_0$ и подставим в (3.6) мощности P_x, dP_x, P_{x+dx}, выраженные через ток и определяющие их параметры. После преобразования получим

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} + \frac{k_т p}{\lambda q} + \frac{I^2 \rho}{q^2 \lambda} = 0.$$

Решая это уравнение с учетом начальных условий, получаем

$$\tau = \frac{I^2 R_{конт}}{2} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_т pq}} e^{-\sqrt{k_т p/\lambda q}\, x} + \frac{I^2 \rho}{k_т pq}.$$

Тогда температура контактной точки

$$\Theta_{конт} = \Theta_0 + \tau_т + \Delta\tau + \Delta\tau_{конт} = \Theta_0 + \frac{I^2 \rho}{k_т pq} +$$

$$+\left(\frac{1}{2}\right) I^2 R_{\text{конт}} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_{\text{т}}\, pq}} + \frac{(IR_{\text{ст}})^2}{8\lambda\rho}, \qquad (3.7)$$

где $\tau_{\text{т}}$ — превышение температуры тела контакта относительно окружающей среды; $\Delta\tau$ — превышение температуры контакта в начале области стягивания;

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} I^2 R_{\text{конт}} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_{\text{т}}\, pq}}.$$

С ростом температуры сопротивление стягивания изменяется из-за роста удельного сопротивления материала.

В [3.4] получена зависимость сопротивления стягивания $R(\Theta)$ от превышения температуры:

$$R(\Theta) = R(0)\,[1 + (2/3)\,\alpha_R\,\Delta\tau_{\text{конт}}], \qquad (3.8)$$

где $R(0)$ — сопротивление стягивания при температуре, равной температуре на границе области стягивания $\Theta = \Theta_0 + \tau_{\text{т}} + \Delta\tau$; α_R — температурный коэффициент сопротивления материала контактов, 1/°С.

При увеличении тока через контакт увеличивается падение напряжения $U_{\text{конт}} = IR_{\text{ст}}$. Согласно (3.5) возрастает превышение температуры контактной площадки $\Delta\tau_{\text{конт}}$. Это в свою очередь вызывает увеличение сопротивления $R_{\text{конт}}$ согласно (3.8). Зависимость сопротивления $R_{\text{конт}}$ от напряжения $U_{\text{конт}}$, называемая $R(U)$-характеристикой контакта, показана на рис. 3.5.

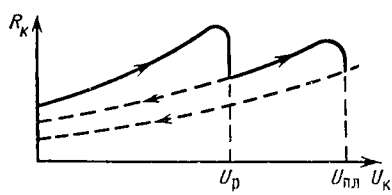


Рис. 3.5. $R(U)$-характеристика контакта

При выводе (3.8) изменение прочности материала не учитывалось, поэтому оно справедливо при температурах, не превосходящих температуру размягчения материала. При температуре размягчения площадка касания увеличивается, а переходное сопротивление резко уменьшается при неизменном нажатии. Это состояние имеет место при $U_{\text{конт}} = U_{\text{р}}$, где $U_{\text{р}}$ — напряжение рекристаллизации или размягчения материала. Если температура продолжает расти, то площадка касания может расплавиться, чему соответствует напряжение плавления $U_{\text{конт}} = U_{\text{пл}}$. Температура контакта не должна достигать температуры размягчения материала.

3.2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОНТАКТОВ

а) **Включение цепи.** При включении электрических аппаратов в их контактных системах могут иметь место следующие процессы: 1) вибрация контактов; 2) эрозия на поверхности контактов в результате образования электрического разряда между ними.

Рассмотрим контактную систему контактора (рис. 3.6). Подвижный контакт *1* связан с контактным рычагом *2* и контактной пружиной *3*. Неподвижный контакт *4* жестко закреплен на опоре. При включении контактора его электромагнит воздействует на рычаг *2*, перемещение которого приводит к соприкосновению контактов *1* и *4*. В момент соприкосновения контактов происходит удар, в результате которого происходят деформация смятия контактов и отброс контакта *1* вправо. Между контактами образуется зазор и под воздействием приложенного к ним напряжения загорается электрическая дуга. Движение контакта *1* вправо прекратится тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины *3*. После этого контакт *1* под действием пружины *3* начнет перемещаться влево. Произойдет новый удар и новый отброс контакта.

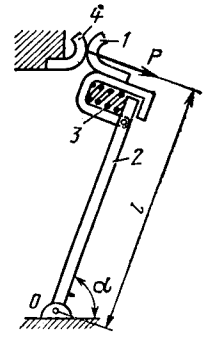
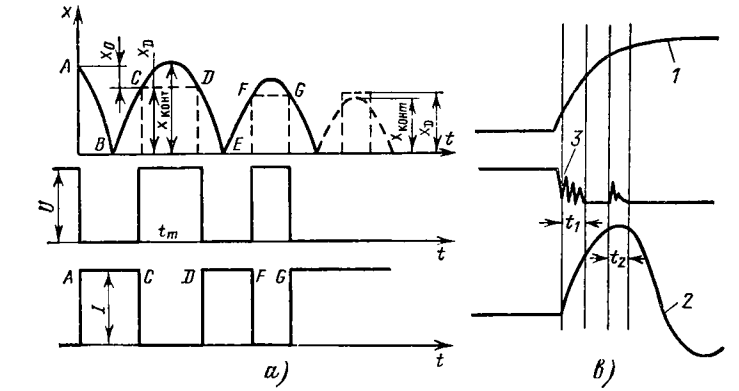


Рис. 3.6. Контактная система контактора в процессе включения

Проследим за процессом вибрации по осциллограмме (рис. 3.7, *а*). На этом рисунке U — напряжение на контактах, I — ток цепи, x — перемещение подвижного контакта после соприкосновения.

Пусть контакты соприкоснулись в точке *A*. Напряжение на контактах стало равным нулю, ток стал равным I. Для упрощения примем, что индуктивность цепи равна нулю. После касания подвижный контакт продолжает двигаться влево (рис. 3.6) за счет инерции подвижных частей и деформации материала контактов. В точке *B* контакт останавливается и начинается движение подвижного контакта вправо за счет упругих сил, возникающих из-за деформации контактов. Этот процесс идет до точки *C*. В точке *C* цепь разрывается, $I=0$, контакт не останавливается, а продолжает движение по инерции до положения $x_{конт}$. После этого подвижный контакт под действием пружины снова стремится замкнуться, и ток появляется в точке *D*. Таким образом, отброс контакта за счет упругих сил материала контактов равен x_D, а за



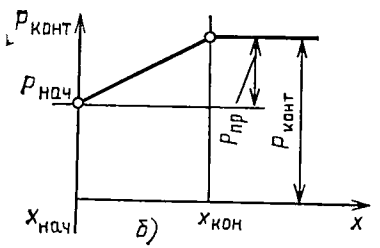


Рис. 3.7. Вибрация контактов при замыкании цепи:

а — процесс вибрации контактов при включении на чисто активную нагрузку; *б* — зависимость контактного нажатия $P_{конт}$ от перемещения подвижного контакта x; *в* — изменение тока в цепи и напряжения на контактах при включении

счет сил инерции $x_{конт}$. В момент времени t_m контакты расходятся на расстояние, равное $x_{конт}—x_D$. Если $x_D \geqslant x_{конт}$, то вибрация контактов не приводит к их размыканию (после точки G).

При вибрации контактов происходит многократное образование электрической дуги, которое приводит к их сильному износу из-за оплавления и распыления материала контактов. В связи с износом контактов уменьшается усилие их нажатия во включенном положении, что приводит к повышению переходного сопротивления. При большом числе включений и отключений возможен быстрый выход контактов из строя. Более подробно вибрация контактов рассмотрена в [4.2].

Для уменьшения вибрации создается предварительная деформация (натяг) контактной пружины при разомкнутых контактах $P_{нач}$. В момент касания контактов усилие нажатия возрастает не с нуля, а с предварительно установленной начальной величины $P_{нач}$ (рис. 3.7, *б*). Расстояние $x_{кон}—x_{нач}$, на которое переместится подвижный контакт, если убрать неподвижный, называется провалом контакта. Усилие $P_{пр}$ создается за счет выбора провала подвижного контакта. При включенном положении на контакты действует конечное нажатие $P_{конт}$. С ростом

начального усилия нажатия $P_{нач}$ вибрация контактов резко сокращается. Однако при чрезмерно большом начальном усилии вибрация может возрасти из-за недостаточной мощности включающего электромагнита. Увеличение жесткости контактной пружины также влияет на уменьшение вибрации. Однако это влияние слабее влияния предварительного натяга.

Иногда между контактным рычагом и подвижным контактом вводится противовибрационный вкладыш из пористого материала, например в виде губчатой резины [3.2]. Этот материал способствует затуханию колебаний контакта и уменьшению его вибрации.

С увеличением тягового усилия электромагнита или тягового момента привода контактора отброс контактов сначала уменьшается, а затем возрастает. В первой области, очевидно, для данной начальной силы нажатия контактов тяговый момент недостаточен и отброс уменьшается с ростом момента. При дальнейшем возрастании тягового момента увеличиваются разгон подвижного контакта и его скорость в момент удара, что ведет к росту амплитуды отброса. В связи с этим большое превышение тяговой характеристики над противодействующей недопустимо (§ 5.7).

Вибрация контактов усиливается с ростом их момента инерции. Из-за этого масса контактов должна быть минимальной.

На рис. 3.7, *в* показано изменение тока при включении цепи постоянного (кривая *1*) и переменного тока (кривая *2*). Кривая *3* иллюстрирует изменение напряжения на контактах при их включении. Время вибрации контактов от удара между собой равно t_1. Удар якоря электромагнита, перемещающего контакт, о неподвижный сердечник вновь вызывает вибрацию подвижного контакта, которая длится в течение времени t_2. К этому времени ток через контакты близок к номинальному, и их вибрация особенно опасна. Для снижения силы удара якоря о сердечник тяговая характеристика электромагнита не должна значительно превышать противодействующую (см. § 5.7). С целью снижения вибраций от удара якоря магнитопровод электромагнита крепится на пружинах-амортизаторах. Как показали исследования, в низковольтных аппаратах время вибрации контактов не превышает 0,5—1 мс.

При включении на существующее КЗ вибрация контактов усиливается из-за возникновения отбрасывающих сил в точке касания (§ 1.6). Для того чтобы не было оплавления контактов в момент их соприкосновения, усилие предварительного натяга контактной пружины должно компенсировать электродинамические силы отброса и создавать такое нажатие, при котором падение напряжения на переходном сопротивлении не приводит к плавлению точки касания [уравнение (3.5)].

Напряжение на контакте в этом режиме $U_{конт}=I_к R_{конт}$.

Этому напряжению соответствует перепад температуры на контактах $\Delta\tau_{конт} = (I_к R_{конт})^2/(8\lambda\rho)$. Этот перепад должен быть меньше, чем температура плавления материала $\Theta_{пл}$.

В аппаратах на большие токи КЗ электродинамические усилия в торцевых контактах (см. рис. 3.2) очень велики и усилия контактных пружин должны достигать нескольких тысяч ньютон. В подобных случаях необходимо переходить к конструкции контактов с меньшей электродинамической силой отброса (см. рис. 3.12).

В процессе включения по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между ними. При определенном расстоянии между контактами произойдет пробой междуконтактного зазора. В аппаратах низкого напряжения пробой возникает при очень малом расстоянии между контактами (сотые доли миллиметра). Электрическая дуга при пробое не возникает, так как подвижный контакт продолжает двигаться и, замыкая промежуток, прекращает разрядные процессы. Однако при пробое электроны бомбардируют контакт с положительным потенциалом — анод, и его материал переходит на катод, откладываясь на нем в виде тонких игл. Износ контактов в результате переноса материала с одного контакта на другой, т. е. испарение в окружающее пространство без изменения состава материала, называется физическим износом или эрозией. Эрозия при замыкании контактов невелика, но при малых нажатиях и малых междуконтактных зазорах она может привести к их привариванию.

В аппаратах высокого напряжения при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникающая дуга горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов, особенно при включении на существующее КЗ. За счет применения большого числа последовательно соединенных разрывов уменьшается напряжение, приходящееся на разрыв (см. § 18.5), что дает возможность снизить время предварительного пробоя до 0,005 с, которое признано безопасным для масляных выключателей.

б) Контакты во включенном состоянии. В этом режиме следует различать два случая: через контакты проходит длительный номинальный ток и через контакты проходит ток КЗ.

В табл. 3.1 приведены температуры и падения напряжения в контакте для двух характерных точек — точки

Таблица 3.1. Температура и падение напряжения в контакте для точки размягчения и точки плавления материала

Материал	Θ_1, °С	$U_{конт1}$, В	Θ_2, °С	$U_{конт2}$, В
Алюминий	150	0,1	658	0,3
Сталь	500	0,21	1530	0,6
Никель	520	0,22	1455	0,65
Медь	190	0,12	1083	0,43
Серебро	150	0,09	960	0,35
Кадмий	—	—	321	0,15
Вольфрам	1000	0,4	3370	1,0
Олово	100	0,07	232	0,13
Платина	540	0,25	1773	0,7
Графит	—	—	4700	5

размягчения материала Θ_1, $U_{конт1}$ и точки плавления материала Θ_2, $U_{конт2}$. Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе $I_{ном}$ падение напряжения на переходном сопротивлении $R_{конт}$ было меньше $U_{конт1}$:

$$I_{ном} R_{конт} = (0{,}5 \div 0{,}8) U_{конт1}. \qquad (3.9)$$

Для расчета контактов на малые токи используется формула (3.9). По заданному току $I_{ном}$ и падению напряжения $U_{конт1}$ определяется переходное сопротивление $R_{конт}$ для данного материала. После этого находится необходимое контактное нажатие с помощью (3.3).

Для одноточечных контактов на большие токи в [2.1] рекомендуется формула

$$P_{конт} = I_{ном}^2 \frac{B \pi HV}{16 \lambda^2 \left(\arccos \frac{T_0}{T_к}\right)^2}, \qquad (3.10)$$

где $P_{конт}$ — контактное нажатие, Н; $I_{ном}$ — действующее значение номинального тока, А; B — число Лоренца; HV — твердость по Виккерсу, Н/м^2; λ — удельная теплопроводность, Вт/(м·°С); $T_к$ — температура точки касания, К; T_0 — температура тела контакта, К. Для наиболее распространенных металлических материалов при температуре 100 °С число Лоренца B меняется в довольно узком пределе $2{,}33 \div 2{,}49 \cdot 10^8$ В^2/°С^2. Твердость по Виккерсу в зависимости от температуры для медного контакта приведена в [2.1]. Твердость по Виккерсу близка к твердости по Бринеллю.

Использовав (2.16), можно получить

$$T_0 = \tau + \Theta_0 + 273 = \frac{I^2 \rho}{k_т p q} + \Theta_0 + 273, \qquad (3.11)$$

где I — действующее значение тока, А; ρ — удельное сопротивление материала контактов, Ом·м; $k_т$ — удельный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); p — периметр сечения контакта, м; q — сечение контакта, м²; Θ_0 — температура окружающей среды, °С, обычно $\Theta_0 = 40$ °С.

Результаты расчета $P_{конт}$ по (3.10) достаточно близки к опытным данным.

Формула (3.10) позволяет по заданному току $I_{ном}$ сразу найти необходимое контактное нажатие $P_{конт}$ по известному отношению $T_0/T_{конт}$. Температура тела контакта T_0 может быть легко найдена по (3.11). Температуру $T_{конт}$ можно определить, воспользовавшись тем, что в большинстве случаев $T_{конт} - T_0 \leqslant 5 \div 10$ °С.

В аппаратах на большие токи применяются многоламельные (пальцевые) контакты (рис. 3.16, 3.18). Учитывая неравенство сопротивлений отдельных ветвей, получаем ток через каждую ламель

$$I_л = I_{ном} k_н / n,$$

где $k_н$ — коэффициент неравномерности, обычно $k_н = 1{,}3$; n — число ламелей.

Нажатие в каждой контактной площадке рассчитывается по току $I_{конт}$ с помощью (3.10).

При КЗ через контакты проходят токи, в 10—20 раз превышающие номинальные значения. Из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки поднимается практически мгновенно и может достигнуть температуры плавления.

Следует отметить, что с точки зрения нагрева контакты являются наиболее нагруженным местом токоведущей цепи. При больших токах (2 кА и выше) идут по пути повышения температуры контактной точки до 200 °С (при серебряных контактах) и применения жидкостного охлаждения. В этом случае удается значительно облегчить контактную систему, уменьшить габаритные размеры аппарата и получить высокое быстродействие.

Аналитический расчет плавящего тока при КЗ затруднен, так как существующие формулы не учитывают размягчения материала при высокой температуре. Поэтому при расчетах целесообразно пользоваться опытными дан-

ными, непосредственно связывающими ток сваривания и контактное нажатие. При расчетах электродинамической стойкости контактов достаточно точна экспериментальная формула [3.1]

$$i \leqslant k_2 \sqrt{P_{\text{конт}}}, \qquad (3.12)$$

где i — ток электродинамической стойкости (амплитуда ударного тока), А; $P_{\text{конт}}$ — контактное нажатие, Н.

Значения коэффициента k_2 приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. **Коэффициент k_2 для расчета динамической стойкости контактов**

Тип контакта	Материал	k_2, А/Н$^{1/2}$
Щеточный	Медь — латунь	950—1270
Пальцевый несамоустанавливающийся	Медь — медь	1300
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь — медь	1200
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь — сталь	1520
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь — латунь	1600
Пальцевый самоустанавливающийся	Медь — латунь	1820
Розеточный (на один элемент розетки)	Медь — латунь	1740
Розеточный (на один элемент розетки)	Медь — медь	1900

Вероятность приваривания контактов зависит от их конструкции и от всей токоведущей цепи аппарата. Электродинамические силы, действующие между токоведущими деталями, необходимо использовать для повышения электродинамической стойкости контактов. Так, например, при кинематической схеме аппарата по рис. 3.8, *а* контактная

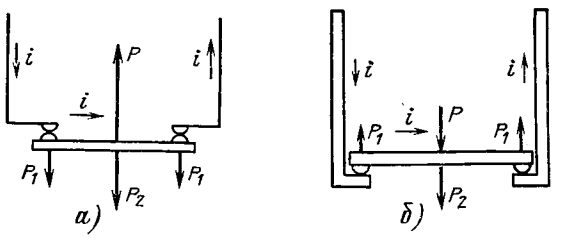


Рис. 3.8. Использование ЭДУ контура для повышения динамической стойкости контактов

пружина P должна создавать усилие $2P_1$, рассчитываемое по (3.12), и усилие P_2, создаваемое вертикальными токоведущими деталями.

При кинематической схеме по рис. 3.8, *б* электродинамическое усилие P_2, действующее на перемычку, позволяет выбрать контактную пружину с меньшим усилием нажатия.

в) Отключение цепи. В процессе размыкания контактов контактное нажатие уменьшается, переходное сопротивление возрастает, и за счет этого растет температура точек касания. В момент разъединения контакты нагреваются до температуры плавления и между ними возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает дуговой (табл. 3.3) либо тлеющий разряд.

Таблица 3.3. **Минимальные значения напряжения и тока, необходимые для поддержания дугового разряда**

Материал контактов	U_0, В	I_0, А	Материал контактов	U_0, В	I_0, А
Платина	17	0,9	Вольфрам	17,0	0,9
Золото	15	0,38	Медь	12,3	0,43
Серебро	12	0,4	Уголь	18—22	0,03

Высокая температура приводит к интенсивному окислению и распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Все это влечет за собой износ контактов. Износ, связанный с окислением и образованием на электродах пленок химических соединений материала контактов со средой, называется химическим износом или коррозией.

Перенос материала с одного электрода на другой наиболее вреден при постоянном токе. Направление переноса в этом случае постоянно, что ведет к быстрому выходу из строя контактов. Перенос материала с анода на катод называется положительной эрозией, перенос в обратную сторону — отрицательной. Мерой эрозии является потеря массы или объема контакта. Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависит от вида разряда и значение тока [3.1].

Для существования дугового разряда необходимо, что-

бы значения напряжения и тока превышали минимальные значения U_0 и I_0, приведенные в табл. 3.3.

Если $I<I_0$ (табл. 3.3), то при напряжении цепи 270—330 В возникает тлеющий разряд или искра.

При $I\leqslant 5$ А срок службы контактов

$$N = 0{,}6V_0\gamma/(\gamma_{\text{конт}}\, q_0),$$

где N — число допустимых отключений, которое может выдержать контакт; V_0 — объем контакта, предназначенный на износ, м^3; γ — плотность материала, кг/м^3; $\gamma_{\text{конт}}$ — эмпирический коэффициент износа, кг/Кл; q_0 — количество электричества, протекающего через межконтактный промежуток за одно отключение, Кл.

Значения коэффициента $\gamma_{\text{конт}}$, 10^{-9} кг/Кл, приведены ниже:

Серебро	3,6—10	Медь	6
Золото	15	Серебро — никель	20
Вольфрам	1,5	Серебро — золото	15
Платина	5,5	Платина — иридий	9

Количество электричества, протекающего через дугу, $q_0=\int_0^{t_г} i\,dt$ находится экспериментально по осциллограмме тока при отключении.

При ориентировочных расчетах можно принять, что ток в процессе гашения дуги спадает по линейному закону. Тогда

$$q_0 = (1/2)\, I_0\, t_г,$$

где I_0 — ток в момент размыкания; $t_г$ — время гашения.

При $I>5$ А хорошие результаты дает формула Р. С. Кузнецова [3.3]

$$m = 10^{-9}\, k_и\, N I^2,$$

где m — износ контакта, г; N — число операций, включение-отключение; I — ток отключения, А; $k_и$ — эмпирический коэффициент, г/А^2.

Значения коэффициента износа $k_и$ приведены ниже:

	Время вибрации, мс	$k_и$
Серебро	0,3	$(1\div 3)\cdot 10^{-6}$
Серебро — оксид кадмия	0,3	$(1\div 2)\cdot 10^{-6}$
Серебро — оксид кадмия	1—5	$(15\div 150)\cdot 10^{-6}$
Серебро — никель	1—5	$(15\div 150)\cdot 10^{-6}$
Серебро	1—5	$50\cdot 10^{-6}$
Медь	1—5	$200\cdot 10^{-6}$

При больших токах (2—50 кА) объемный износ за одно отключение определяется формулой $\Delta V_{эр}=k_{эр}q$. Коэффициент объемной эрозии $k_{эр}$ характеризует объем материала, мм^3, испаряемого при протекании 1 Кл электричества. Этот коэффициент найден экспериментально и приведен в [3.1].

Для борьбы с эрозией контактов на токи от 1 до 600 А: а) сокращается длительность горения дуги с помощью дугогасительных устройств; б) устраняются вибрации контактов при включении; в) применяются дугостойкие материалы контактов.

Для контактов на токи от долей ампера до нескольких ампер применяются схемные методы уменьшения эрозии, примеры которых приведены на рис. 3.7. Как показано в § 4.2, почти вся электромагнитная энергия, накопленная в цепи, при отключении контактов выделяется в дуге. Чем меньше эта энергия, тем меньше эрозия контактов.

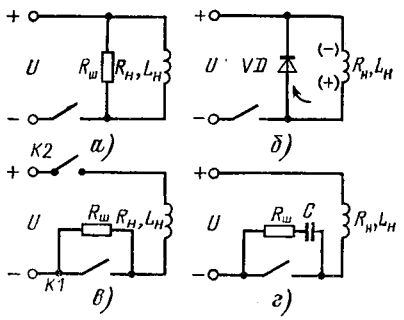


Рис. 3.9. Схемы для уменьшения износа контактов

В схеме рис. 3.9, *а* нагрузка $R_н$, $L_н$ шунтирована резистором $R_ш$. Пусть отключение произошло мгновенно и ток в нагрузке $I_н$ не изменился после отключения. Тогда этот ток протекает через резистор $R_ш$ и вся электромагнитная энергия $LI_н^2/2$ переходит в тепловую, выделяемую в сопротивлении нагрузки $R_н$ и резисторе $R_ш$. В зависимости от сопротивления резистора $R_ш$ разряд между контактами может быть тлеющим или дуговым. Тлеющий разряд отсутствует при $R_ш \leqslant \left(\frac{300}{U}-1\right)R_н$.

Дуга отсутствует при условии

$$R_ш \geqslant \frac{U-U_0}{I_0-U/R},$$

где U_0 и I_0 берутся по табл. 3.3.

Наличие резистора $R_ш$ увеличивает токовую нагрузку контактов, что является недостатком схемы. От этого недостатка свободна схема на рис. 3.9, *б*. В этой схеме контакты нагружаются только током $U/R_н$ и обратным током диода *VD*. При включении цепи через диод *VD* протекает только небольшой обратный ток. При отключении поток в маг-

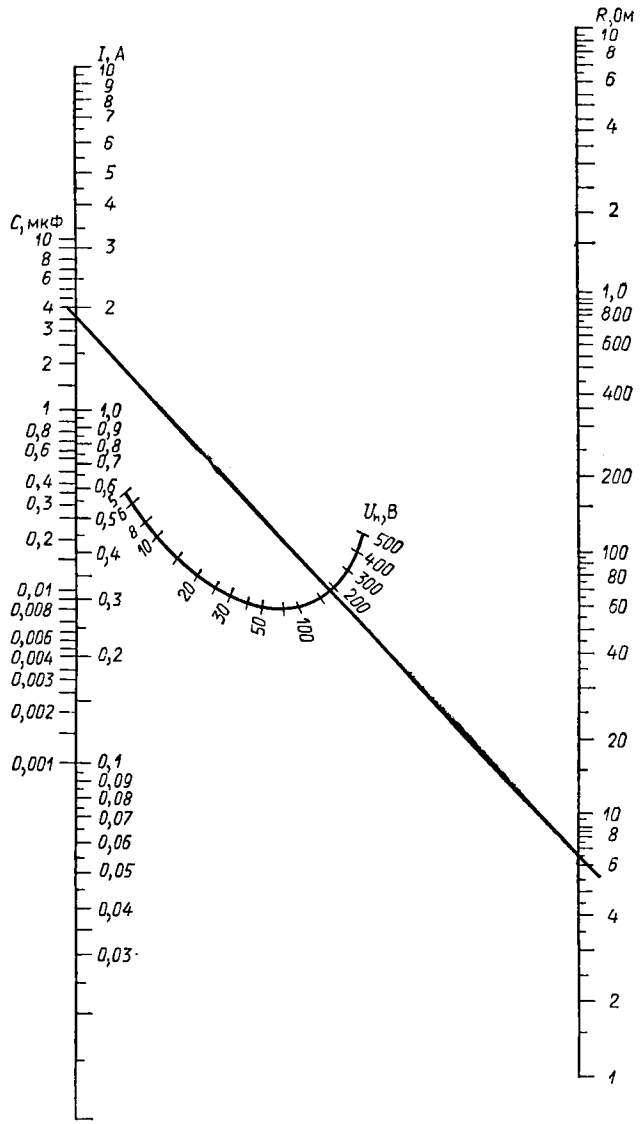


Рис. 3.10. К расчету конденсатора и резистора, шунтирующих контакты

нитной цепи нагрузки начинает спадать и на ней появляется ЭДС самоиндукции $e=-w\frac{d\Phi}{dt}$ с полярностью, обозначенной в скобках. Для этой полярности диод *VD* открыт и закорачивает нагрузку. Вся электромагнитная энергия нагрузки выделяется в сопротивлении $R_н$ и прямом сопротивлении диода.

В схеме рис. 3.9, *в* контактный промежуток шунтируется резистором $R_ш$, что облегчает гашение дуги и уменьшает износ контактов (§ 4.6). В этой схеме для полного отключения цепи необходим дополнительный контакт *K2*, который разрывает цепь после отключения контакта *K1*. Чем меньше сопротивление резистора $R_ш$, тем быстрее гаснет дуга. Однако при этом контакт *K2* нагружается большим током.

В схеме рис. 3.9, *г* контакт шунтирован цепочкой $R_шC$. Положим вначале, что $R_ш=0$. Наличие конденсатора *C* уменьшает ток, текущий через контактный промежуток. Ток в конденсаторе $i_C=Cdu/dt$, где *u* — напряжение на контактах. Наличие конденсатора также снижает скорость нарастания напряжения на контактах. Все это облегчает процесс отключения.

При замыкании цепи возможна сильная эрозия за счет энергии разряда конденсатора. Для ограничения тока разряда служит резистор $R_ш$. Облегчение режима работы контактов осуществляется их шунтированием цепочкой *RC*. Выбор параметров цепочки производится с помощью номограммы на рис. 3.10. По току и напряжению на нагрузке *I* и $U_н$ находим емкость шунтирующего конденсатора *C*, проведя прямую через точки с координатами *I* и $U_н$. Эта же прямая на оси *R* указывает сопротивление резистора.

Пример расчета: $U = 200$ В, $I = 2$ А; находим $R = 6{,}5$ Ом, $C = 3{,}5$ мкФ.

3.3. МАТЕРИАЛЫ КОНТАКТОВ

К материалам контактов современных электрических аппаратов предъявляются следующие требования:

1) высокие электрическая проводимость и теплопроводность;

2) высокая коррозионная стойкость в воздушной и других средах;

3) стойкость против образования пленок с высоким электрическим сопротивлением;

4) малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;

5) высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;

6) малая эрозия;

7) высокая дугостойкость (температура плавления);

8) высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;

9) простота обработки, низкая стоимость.

Свойства некоторых контактных материалов рассмотрены ниже.

Медь. Положительные свойства: высокие удельная электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях и отключениях довольно высокие значения U_0 и I_0, простота технологии, низкая стоимость.

Недостатки: достаточно низкая температура плавления, при работе на воздухе покрывается слоем прочных оксидов, имеющих высокое сопротивление, требует довольно больших сил нажатия. Для защиты меди от окисления поверхность контактов покрывается электролитическим способом слоем серебра толщиной 20—30 мкм. В контактах на большие токи иногда ставятся серебряные пластинки (в аппаратах, включаемых относительно редко). Применяется как материал для плоских и круглых шин, контактов аппаратов высокого напряжения, контакторов, автоматов и др. Вследствие низкой дугостойкости нежелательно применение в аппаратах, отключающих мощную дугу и имеющих большое число включений в час.

В контактах, не имеющих взаимного скольжения, из-за пленки оксидов применение меди не рекомендуется.

Серебро. Положительные свойства: высокие электрическая проводимость и теплопроводность, пленка оксида серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки. Контакт серебра устойчив благодаря малому напряжению на смятие $\sigma_{см}$. Для работы достаточны малые нажатия (применяется при нажатиях 0,05 Н и выше). Устойчивость контакта, малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Недостатки: малая дугостойкость и недостаточная твердость препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и частых включениях и отключениях.

Применяется в реле и контакторах при токах до 20 А. При больших токах вплоть до 10 кА серебро используется как материал для главных контактов, работающих без дуги.

Алюминий. Положительные свойства: достаточно высокие электрическая проводимость и теплопроводность. Благодаря малой плотности токоведущая часть круглого сечения из алюминия на такой же ток, как и медный проводник, имеет почти на 48 % меньшую массу. Это позволяет уменьшить массу аппарата.

Недостатки: 1) образование на воздухе и в активных средах пленок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; 2) низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); 3) малая механическая прочность; 4) из-за наличия

в окружающем воздухе влаги и оксидов медный и алюминиевый контакты образуют своеобразный гальванический элемент. Под действием ЭДС этого элемента происходит электрохимическое разрушение контактов (электрохимическая коррозия). В связи с этим при соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром.

Алюминий и его сплавы (дюраль, силумин) применяются главным образом как материал для шин и конструкционных деталей аппаратов.

Вольфрам. Положительные свойства: высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии, сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатки: высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, образование прочных оксидных и сульфидных пленок. В связи с образованием пленок и их высокой механической прочностью вольфрамовые контакты требуют большого нажатия.

В реле на малые токи с небольшим нажатием применяются стойкие против коррозии материалы — золото, платина, палладий и их сплавы.

Металлокерамические материалы. Рассмотрение свойств чистых металлов показывает, что ни один из них не удовлетворяет полностью всем требованиям, предъявляемым к материалу контактов.

Основные необходимые свойства контактного материала — высокие электрическая проводимость и дугостойкость — не могут быть получены за счет сплавов таких материалов, как серебро и вольфрам, медь и вольфрам, так как они не образуют сплавов. Материалы, обладающие необходимыми свойствами, получают методом порошковой металлургии (металлокерамики). Полученные таким методом материалы сохраняют физические свойства входящих в них металлов. Дугостойкость металлокерамики обеспечивается такими компонентами, как вольфрам, молибден. Низкое переходное сопротивление контакта достигается использованием в качестве второго компонента серебра или меди. Чем больше содержание вольфрама, тем выше дугостойкость, механическая прочность и меньше возможность приваривания металлокерамических контактов. Но соответственно растет переходное сопротивление контактов и уменьшается их теплопроводность. Обычно металлокерамика с содержанием вольфрама выше 50 % применяется для аппаратов защиты на большие токи КЗ.

Композиции из тонко измельченных порошков с диаметром зерна менее 10 мкм имеют мелкодисперсную структуру и обладают большой механической прочностью. Их износостойкость в 1,5—2 раза выше, чем у материалов немелкодисперсного типа.

Свойства и состав наиболее распространенных материалов для металлокерамических контактов приведены в табл. 3.4.

Для контактов аппаратов высокого напряжения наиболее распространена металлокерамика КМК-А60, КМК-А61, КМК-Б20, КМК-Б21.

Таблица 3.4. **Состав и свойства металлокерамических материалов**

Марка материала	Компоненты и их содержание, %	Плотность, кг·м$^{-3}$	Число Бринелля	Удельное сопротивление, мкОм·м, не более	Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)
КМК-А10	Серебро — оксид кадмия, 85/15	9700	75	0,030	325
КМК-А10м	То же с мелкодисперсной структурой	9900	105	0,028	325
КМК-А20	Серебро — оксид меди, 90/10	9500	60	0,025	350
КМК-А20м	То же с мелкодисперсной структурой	9600	75	0,024	350
КМК-А41	Серебро — графит, 97/3	9300	50	0,026	—
КМК-А33мд	Серебро — никель — графит, 69/29/2	9500	95	0,035	—
КМК-А60	Серебро — вольфрам — никель, 47/50,5/2,5	13 500	160	0,041	275
КМК-А61	Серебро — вольфрам — никель, 27/70/3	15 000	210	0,045	230
КМК-Б10	Медь — графит, 97/3	7300	35	0,040	380
КМК-Б20	Медь — вольфрам — никель, 48/50/2	12 100	150	0,060	190
КМК-Б21	Медь — вольфрам — никель, 27/70/3	13 800	200	0,070	135

В аппаратах низкого напряжения чаще всего применяется металлокерамика КМК-А10 из серебра и оксида кадмия CdO. Отличительной особенностью этого материала является диссоциация CdO на пары кадмия и кислород. Выделяющийся газ заставляет дугу быстро перемещаться по поверхности контакта, что значительно снижает температуру контакта и способствует деионизации дуги. Металлокерамика КМК-А20, состоящая из серебра и 10 % оксида меди, обладает большей износостойкостью, чем КМК-А10.

Серебряно-никелевые металлокерамики хорошо обрабатываются, обладают высокой стойкостью против электрического износа. Контакты из этих материалов обеспечивают низкое и устойчивое переходное сопротивление, но более подвержены привариванию, чем контакты КМК-А60, КМК-Б20, КМК-А10.

Серебряно-графитовые и медно-графитовые контакты благодаря высокой устойчивости против сваривания применяются как дугогасительные. Применение металлокерамики увеличивает стоимость аппаратуры, однако в эксплуатации эти затраты окупаются за счет увеличения срока службы аппарата и повышения его надежности.

3.4. КОНСТРУКЦИЯ ТВЕРДОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

а) Неподвижные разборные и неразборные контакты. Такие контакты служат для соединения неподвижных токоведущих деталей шин, кабелей и проводов. Эти детали могут находиться как внутри электрического аппарата, так и вне его. В последнем случае они служат для присоединения аппарата к источнику энергии или к нагрузке. Контакты соединяются с помощью либо болтов (разборные соединения), либо горячей или холодной сварки.

При болтовом соединении медные шины перед сборкой тщательно зачищаются от оксидов и смазываются техническим вазелином. После сборки места стыков между шинами покрываются влагостойким лаком или краской. При этом уменьшается переходное сопротивление и повышается его стабильность во времени.

Покрытие соприкасающихся поверхностей контактов оловом (лужение) несколько увеличивает начальное переходное сопротивление, но благодаря пластичности олова увеличивает количество площадок смятия и переходное сопротивление становится более стабильным. Для токоведущих деталей, от которых требуется повышенная надежность при больших номинальных токах, рекомендуется серебрение соприкасающихся поверхностей. Описанные разборные контактные соединения могут быть разобраны при

ремонте и монтаже и имеют малое переходное сопротивление.

Рекомендуемые давления одной шины на другую, 10^4 Па, при болтовом соединении приведены ниже.

Материалы соединения	
Медь луженая	500—1000
Медь, латунь, бронза нелуженые	600—1200
Алюминий	2500

Момент при затяжке болтов контролируется специальным тарированным моментным ключом. Болтовые соединения могут оказаться недостаточно надежными, особенно при алюминиевых контактах. Поэтому в настоящее время алюминиевые токоведущие детали соединяются с помощью холодной или горячей (термитной) сварки и представляют после этого неразборный контакт.

В болтовом шинном соединении при КЗ токоведущий проводник нагревается до температуры 200—300 °С.

Стягивающие стальные болты нагреваются в основном за счет теплопроводности, так как ток через болты практически не проходит. Температура болтов обычно не превосходит 20 % температуры шин. Температурный коэффициент расширения у меди и алюминия значительно выше, чем у стали, поэтому шины, увеличиваясь по толщине больше, чем удлиняются болты, растягивают их. При этом деформация болтов может перейти за пределы упругости. Тогда после отключения цепи и остывания контакта из-за вытягивания болтов нажатие в контактах уменьшится, что приведет к увеличению сопротивления, сильному нагреву и последующему разрушению.

Для того чтобы избежать пластической деформации шин, ставятся соответствующие шайбы. Вследствие малой прочности алюминиевых шин может произойти пластическая их деформация, что приведет к порче контакта. Поэтому для стабильности алюминиевого контакта необходимо либо производить предварительный обжим, уплотнение шин, либо ставить под гайки пружинящие шайбы или специальные пружины, которые ограничивают деформации элементов контактов.

б) Подвижные неразмыкающиеся контактные соединения. Такие соединения используются либо для передачи тока с подвижного контакта на неподвижный, либо при не-

большом перемещении неподвижного контакта под действием подвижного.

Наиболее простым соединением такого типа является гибкая связь (рис. 3.11). Неподвижный контакт *1* крепится к каркасу аппарата на изоляционной подкладке. Подвижный контакт *2* вращается относительно точки *0*, расположенной на контактном рычаге *4*. Этот рычаг изолирован от вала *5*, на который действует электромагнит контактора. Гибкая связь *6* соединяет подвижный контакт *2* с выводом аппарата. Контактное нажатие создается пружиной *3*. Для

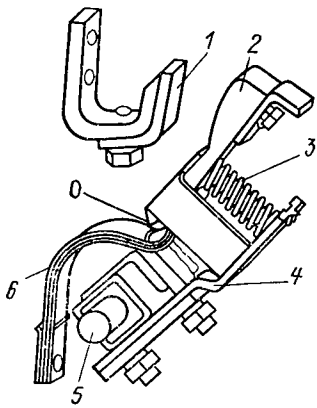


Рис. 3.11. Передача тока с подвижного контакта на вывод аппарата с помощью гибкой связи

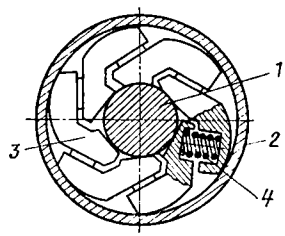


Рис. 3.12. Скользящий токосъемный розеточный контакт

получения необходимой эластичности гибкая связь изготовляется из медной ленты толщиной $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ м и менее или из многожильного жгута, сплетенного из медных жил ($0{,}1 \cdot 10^{-3}$ м и менее). При наличии резких перегибов гибкая связь быстро разрушается.

При больших ходах подвижных контактов длина гибкой связи получается значительной, а ее надежность уменьшается. Поэтому она применяется при перемещениях подвижного элемента не более 0,25 м.

При больших ходах и больших номинальных токах применяются контактные соединения в виде скользящих и роликовых токосъемов. Принцип действия токосъема ясен из рис. 3.12 и 3.13. Подвижный контакт *1* скользящего токосъема (рис. 3.12) выполнен в виде стержня круглого сечения. Цилиндрическая обойма *2* соединяется с неподвиж-

ным выводом аппарата. Соединение контакта *1* и обоймы *2* осуществляется пальцами (ламелями) *3*. Контактное нажатие создается пружинами *4*. Подвижный контакт имеет возможность перемещаться поступательно. Неподвижный контакт имеет поверхность касания в виде плоскости, подвижный — в виде цилиндрической поверхности. Контактирование осуществляется по линии, отчего контакт называется линейным.

Недостатком скользящего токосъема является большая сила трения, которая требует значительной мощности приводного механизма. Сила трения уменьшается при роликовом контакте (рис. 3.13). Подвижный контакт *1* роликового

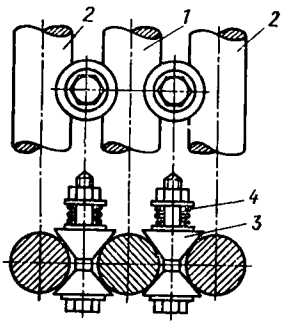


Рис. 3.13. Роликовый токосъемный контакт

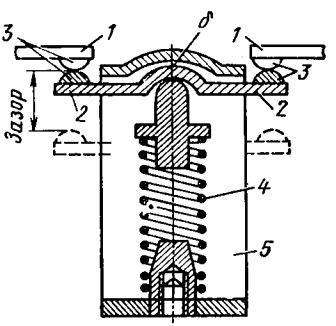


Рис. 3.14. Контактный узел с самоустанавливающимся контактом

токосъема (рис. 3.13) выполнен в виде стержня круглого сечения и имеет поступательное движение. Токосъемные стержни *2* также имеют круглое сечение и соединены с выводом аппарата. Соединение стержня *1* и стержней *2* осуществляется с помощью конусных роликов *3*, которые катятся по поверхности стержней *1* и *2*. Контактное нажатие создается пружинами *4*.

Число роликов зависит от номинального тока и тока КЗ. Этот контакт для своего перемещения требует небольших усилий и широко применяется в современной аппаратуре высокого напряжения.

в) Разрывные контакты. Контакты многих аппаратов разрывают цепь с током, большим, чем минимальный ток дугообразования $I_д$. Возникающая электрическая дуга приводит к быстрому износу контактов.

Для надежного гашения дуги, образующейся при отключении, необходимо определенное расстояние между неподвижным и подвижным контактами, которое выбирается с запасом. Расстояние между неподвижным и подвижным контактами в отключенном состоянии аппарата называется зазором контактов (рис. 3.14, 3.15). Конструкция разрывных контактов определяется значениями номинального тока, номинального напряжения, тока КЗ, режимом работы, назначением аппарата и рассмотрена в разделах, посвященных устройству различных аппаратов. Здесь же рассмотрим только некоторые общие вопросы.

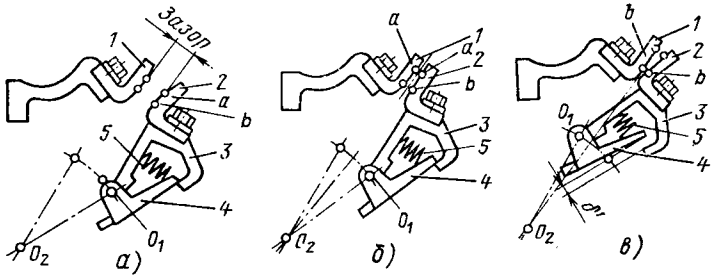


Рис. 3.15. Контактный узел с перекатыванием подвижного контакта

Число площадок касания и стабильность переходного сопротивления зависят от конструкции крепления подвижного и неподвижного контактов. Подвижные контакты, имеющие возможность устанавливаться в положение с максимальным числом контактных площадок, называются самоустанавливающимися. Контактный узел с самоустанавливающимся контактом дан на рис. 3.14. Неподвижные контакты *1* и подвижный мостиковый контакт *2* в месте касания имеют сферические (или цилиндрические) напайки *3*, выполненные из серебра или металлокерамики. Контактное нажатие создается пружиной *4*. После касания контактов скоба *5*, связанная с приводом аппарата, продолжает свое движение вверх на величину хода, равную провалу δ. Применительно к конструкциям, показанным на рис. 3.14 и 3.15, провалом называется расстояние, на которое переместится подвижный контакт, если убрать неподвижный.

На рис. 3.15 показана работа контактной системы, широко применяемой в контакторах с медными контактами.

Для наглядности точки начального и конечного касания обозначены буквами *а* и *b*. При включении контактный рычаг *4* вращается электромагнитом вокруг центра O_2, а точка O_1 вращения контактной скобы *3* перемещается по радиусу O_2O_1.

Касание пальцевых контактов *1* и *2* происходит в точках *а* (рис. 3.15, *б*). При дальнейшем перемещении O_1 точка касания переходит в точку *b* (рис. 3.15, *в*). При этом происходит перекатывание контакта *2* по контакту *1* с небольшим проскальзыванием, за счет чего пленка оксида на них стирается.. При включении контактов, отключавших дугу, из-за шероховатости поверхности касания появляется дополнительная вибрация контактов. Для уменьшения вибрации проскальзывание должно быть небольшим. При отключении дуга загорается между точками *а—а*, что предохраняет от оплавления точки *b—b*, в которых контакты касаются уже во включенном положении. Таким образом, контакт разделяется на две части: в одной происходит гашение дуги, в другой ток проводится длительно. Поскольку для контактов по рис. 3.15 непосредственный контроль провала δ затруднен, о нем судят по зазору δ' между рычагом *4* и контактной скобой *3*. Контактное нажатие создается пружиной *5*.

Во всех без исключения аппаратах имеется провал контактов, который обеспечивает их необходимое нажатие. Вследствие обгорания и износа контактов в эксплуатации провал уменьшается, что приводит к уменьшению контактного нажатия и росту переходного сопротивления. Поэтому при эксплуатации провал контактов должен контролироваться и находиться в пределах, требуемых заводом-изготовителем. Особенно это относится к аппаратам, работающим в режиме частых включений и отключений (контакторы), где износ контактов интенсивен. Допустимое уменьшение провала обычно составляет 50 % начального значения.

В торцевом мостиковом контакте (рис. 3.14) провал обычно составляет 3—5 мм. В мощных выключателях высокого напряжения он увеличивается до 8—10 мм.

В высоковольтных масляных выключателях широко применяется розеточная система (рис. 3.16). Неподвижный контакт состоит из пальцев (ламелей) *1*, расположенных по окружности. Для уменьшения обгорания концы ламелей снабжены металлокерамическими наконечниками *2*. Контактное нажатие создается пружинами *3*. Ламели с по-

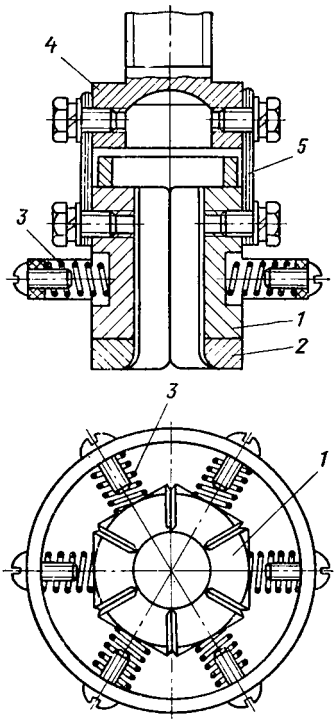


Рис. 3.16. Неподвижный розеточный контакт

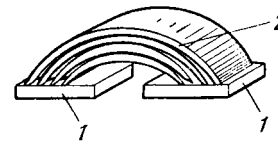


Рис. 3.17. Щеточные контакты

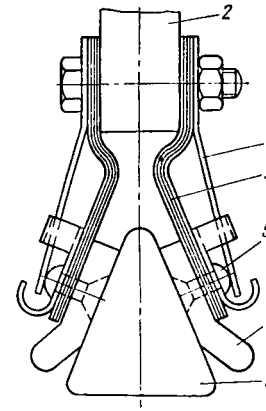


Рис. 3.18. Пальцевый самоустанавливающийся контакт

мощью гибких связей *5* соединяются с медным цоколем *4*. Параллельное соединение шести ламелей снижает переходное сопротивление контакта и облегчает работу контакта при токах КЗ, так как через ламель протекает примерно $^1/_6$ полного тока контакта. Контактное нажатие обратно пропорционально квадрату числа ламелей. Подвижный контакт выполнен в виде стержня круглого сечения, движущегося поступательно. Конец стержня снабжен металлокерамическим наконечником.

Для главных контактов применяется щеточная система (рис. 3.17). Неподвижные контакты *1* выполняются в виде массивных медных призм, часто покрываемых серебром. Подвижные контакты выполнены в виде пакета эластичных медных пластин *2*. Большое количество пластин созда-

ет многоточечный контакт с малым переходным сопротивлением. При нажатии на подвижный контакт происходит деформация пластин, скольжение линии касания по поверхности неподвижного контакта и разрушение пленки оксидов.

Широкое применение получили пальцевые самоустанавливающиеся контакты (рис. 3.18). Неподвижным контактом являются пальцы (ламели) *1*, выполняемые из меди. Пальцы крепятся к выводу *2* гибкими связями *3*. Нажатие контактов создается плоскими пружинами *4*. Для получения наибольшего числа площадок касания пружина *4* действует на контакт *1* через сферическую поверхность заклепки *5* (самоустанавливающийся контакт).

Если не имеется возможности подвижному контакту самоустанавливаться, то такой контакт называется несамоустанавливающимся (пружина *4* жестко соединена с контактом *1*). Подвижный контакт выполнен в виде латунной призмы *6*.

На рис. 3.19 показана двухступенчатая контактная система с главными *1—1′* и дугогасительными *2—2′* контактами. Главные контакты выполняются из меди, а поверхности их соприкосновения из серебра, нанесенного электролитически (слой 20 мкм) или в виде припаянных пластин. Дугогасительные контакты выполняются из меди и имеют наконечники из дугостойкого материала — вольфрама или металлокерамики.

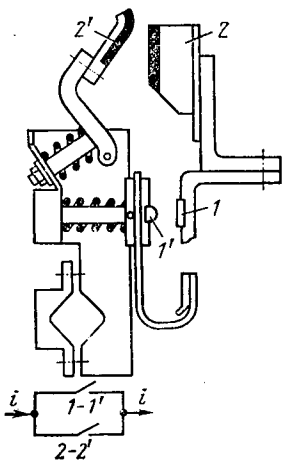


Рис. 3.19. Двухступенчатая контактная система

Ввиду того что переходное сопротивление цепи главных контактов значительно меньше, чем дугогасительных, через них проходит 70—80 % длительного тока. При отключении вначале расходятся главные контакты и весь ток цепи замыкается по дугогасительным контактам.

Дугогасительные контакты *2—2′* расходятся в тот момент, когда расстояние между главными контактами достаточно, чтобы выдержать наибольшее напряжение, возникающее в процессе гашения дуги на дугогасительных контактах.

Необходимо отметить, что при отключении больших токов на главных контактах может возникнуть дуга [8.1]. Дело в том, что после раз-

мыкания главных контактов весь ток цепи начинает проходить через дугогасительную систему и на главных контактах появляется напряжение. Допустим, что дугогасительная система имеет сопротивление R_2 и индуктивность L_2, а скорость нарастания тока в этой цепи di_2/dt. Тогда напряжение на главных контактах $u_2=i_2R_2+L_2di_2/dt$ может оказаться достаточным для пробоя промежутка между ними. Согласно рекомендации [3.3] для уменьшения обгорания главных контактов необходимо уменьшать индуктивность L, равную

$$L = L_1 + L_2 - 2M,$$

где L_2 — индуктивность цепи дугогасительной системы; L_1 — индуктивность цепи главных контактов; M — взаимная индуктивность этих цепей.

При включении двухступенчатой системы вначале замыкаются дугогасительные контакты, а затем главные, что обеспечивает отсутствие дуги и оплавления серебряных поверхностей главных контактов. Ввиду своей сложности двухступенчатые системы применяются только при очень больших токах (более 2000 А) в автоматах и выключателях высокого напряжения. Во всех остальных случаях надежная работа контактов обеспечивается выбором их материала и конструкции при использовании одноступенчатой системы.

В заключение отметим, что в настоящее время начинают широко применяться электрические аппараты с герметизированными контактами (§ 11.1) и контактами, работающими в глубоком вакууме (§ 18.8).

3.5. ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

Наиболее характерные недостатки твердометаллических контактов следующие:

1. С ростом длительного номинального тока возрастают необходимое значение контактного нажатия, габариты и масса контактов. При токах 10 кА и выше резко увеличиваются габариты и масса аппарата в целом.

2. Эрозия контактов ограничивает износостойкость аппарата.

3. Окисление поверхности и возможность приваривания контактов понижают надежность аппарата. При больших токах КЗ контактные нажатия достигают больших значений, что увеличивает необходимую мощность привода, габариты и массу аппарата.

Рассмотрим принцип действия контактора с жидкометаллическим контактом (ЖМК) (рис. 3.20). Внешняя цепь подключается к электродам *1* и *2*. Корпус *3* выполнен из

электроизоляционного материала. Полости корпуса заполнены жидким металлом *4* и соединяются между собой отверстием *5*. Внутри полостей корпуса плавают пустотелые ферромагнитные цилиндры *6*. При подаче напряжения на катушку *7* цилиндры *6* опускаются вниз. Жидкий металл поднимается и через отверстие *5* соединяет электроды *1* и *2*, контактор включается.

По сравнению с твердометаллическими ЖМК обладают следующими преимуществами:

1. Малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела жидкий металл — электрод (до 120 А/мм²), что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах.

2. Отсутствие вибрации, приваривания, залипания и окисления контактов при их коммутации.

3. Высокая механическая и электрическая износостойкость ЖМК, что позволяет создавать аппараты с большим сроком службы.

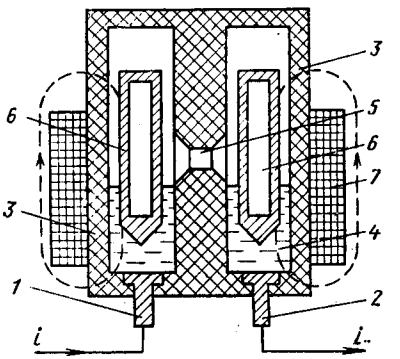


Рис. 3.20. Контактор с жидкометаллическим контактом

4. Возможность разработки коммутационных аппаратов на новом принципе [автоматический восстанавливающийся предохранитель (гл. 16) и др.] благодаря свойствам текучести жидкого металла.

5. Возможность работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

К электрическим аппаратам обычно предъявляется требование сохранять работоспособность в интервале температур ±40 °С. Очевидно, что жидкий металл должен сохранять свое состояние в указанном интервале. Из известных материалов только ртуть находится в жидком виде при температуре ниже 0 °С и может быть в чистом виде пригодна для ЖМК. Высокая токсичность паров ртути существенно осложняет технологию ее применения.

В ЖМК перспективно применение диэлектрического или металлокерамического твердого каркаса, пропитанного

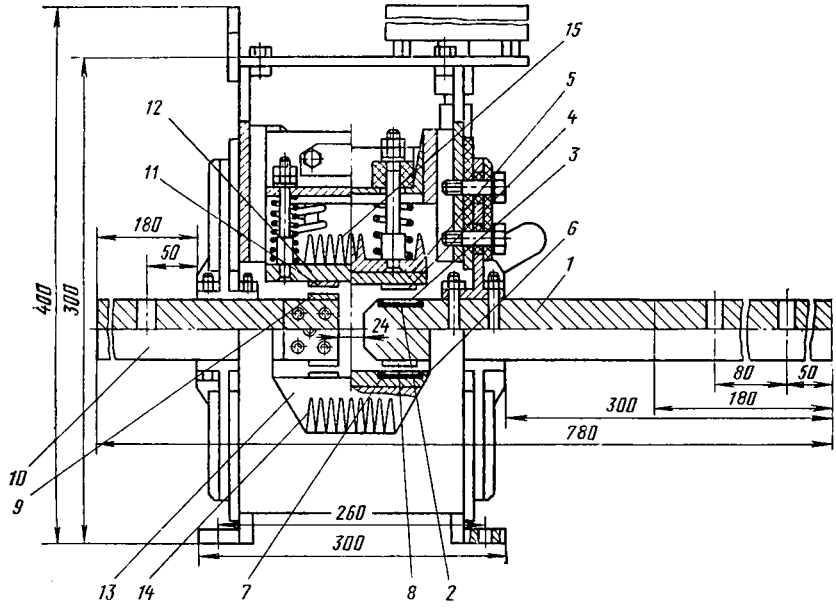


Рис. 3.21. Выключатель с жидкометаллическим контактом

жидким металлом. В этом случае жидкий металл удерживается в капиллярах каркаса и образует на его поверхности пленку, с которой происходит контактирование. Такие ЖМК могут занимать любое положение в пространстве.

На рис. 3.21 показан выключатель с ЖМК на номинальный ток 40 кА и номинальное напряжение 100 В [3.4]. В выключателе используется двухступенчатая контактная система. Главные жидкометаллические контакты состоят из двенадцати мостиковых контактов, включенных параллельно. Дугогасительные имеют четыре параллельных мостиковых контакта и снабжены металлокерамическими пластинами. На вводе *1* главного мостикового контакта сверху располагается углубление *2* с жидким контактным материалом. В этом углублении находятся сетчатые прокладки *3*, пропитанные жидким металлом. Подвижный твердометаллический контакт *4* укреплен на мостике *5*. Внизу расположена вторая траверса *6*, в которой также имеется углубление с жидким металлом и сетчатой прокладкой *7*. Твердометаллический контакт *8* расположен на вводе *1*.

Аналогичное устройство имеет вторая половина мостикового контакта.

Дугогасительный неподвижный контакт из металлокерамики *9* расположен на вводе *10*, подвижный *11* — на мостике дугогасительных контактов *12*. Аналогичное устройство расположено на второй половине выключателя. Выключатель имеет пневматический привод. При включении вначале перемещается верхний мостик *11* вниз, а нижний *13* вверх. Происходит замыкание дугогасительных контактов. Затем перемещается верхний мостик *5* главного контакта вниз, а нижний *6* вверх. При этом замыкаются главные контакты. При отключении вначале размыкаются (без дуги) главные контакты, а затем дугогасительные. Следует отметить, что из-за большого тока в переходных контактах выделяется мощность около 2 кВт. Для рассеивания этой мощности контактные мосты снабжены радиаторами *14* и *15*. Применение ЖМК дает возможность снизить переходное сопротивление контактов, уменьшить мощность приводного механизма и габаритные размеры всего аппарата в целом.

Весьма перспективным является применение ЖМК в самовосстанавливающихся предохранителях (см. § 16.4).

Необходимо отметить и недостатки ЖМК:

1. Обычно применяемые контактные материалы галий и его сплавы с другими металлами требуют подогрева контактов до момента включения, так как температура окружающей среды может быть ниже температуры затвердевания этих материалов.

2. Большинство аппаратов с ЖМК требуют определенного положения в пространстве и подвержены влиянию сторонних механических воздействий (ударов, вибраций), что затрудняет их применение.

3.6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КОНТАКТОВ АППАРАТА

Пример 1. Контакты образованы двумя торцами медных цилиндров с диаметром $d=0{,}03$ м. Определить контактное нажатие при длительном токе 1000 А и токе КЗ 30 кА. Температура окружающей среды $\Theta_0=40$ °С.

Необходимое контактное нажатие, Н, если исходить из длительного режима работы, по (3.10)

$$P = \frac{I_{\text{ном}}^2 B\pi \,\text{HV}}{16\lambda^2 \left[\arccos \dfrac{T_0}{T_{\text{конт}}}\right]^2},$$

где $I_{ном}=1000$ А; теплопроводность меди $\lambda=3{,}9\cdot10^{-2}$ Вт/(м·°С) [2.1]; $B=2{,}42\cdot10^{-8}$ (В/°С)^2; HV — число твердости по Виккерсу, равное $37\cdot10^7$ Па [18.2]; $k_т=12$ Вт/(м^2·°С) (табл. 2.1).

Температура тела контакта

$$T_0=\Theta_0+273+\frac{I^2\rho}{k_т pq};$$

$$\rho=\rho_0(1+\alpha\Theta_т)=1{,}55\cdot10^{-8}(1+0{,}004\cdot70)=1{,}99\cdot10^{-8}\ \text{Ом·м};$$

$$q=\frac{\pi d^2}{4}=\frac{\pi\cdot0{,}03^2}{4}=7{,}07\cdot10^{-4}\ \text{м}^2;$$

$$p=\pi d=\pi\cdot0{,}03=9{,}45\cdot10^{-2}\ \text{м};$$

$$T_0=40+273+\frac{1000^2\cdot1{,}99\cdot10^{-8}}{12\cdot9{,}45\cdot7{,}07\cdot10^{-6}}=338\ \text{К}.$$

Согласно § 3.2 $T_к-T_0=5\div10$ К;

$$P=\frac{1000^2\cdot2{,}42\cdot10^{-8}\cdot3{,}14\cdot37\cdot10^7}{16\cdot3{,}9^2\cdot10^4\left(\arccos\dfrac{338}{348}\right)^2}=382\ \text{Н}.$$

Необходимое контактное нажатие с учетом тока КЗ согласно (3.12) $P\geqslant i_{уд}^2/k_2^2$; $i_{уд}=1{,}8\sqrt{2}\cdot30\cdot10^3=76{,}5\cdot10^3$ А. Торцевой контакт, образуемый касанием торцов двух стержней, может рассматриваться как пальцевый несамоустанавливающийся контакт.

Согласно табл. 3.2 $k_2=1300$, следовательно,

$$P\geqslant5820\cdot10^6/(169\cdot10^4)=3340\ \text{Н}.$$

Таким образом, данная система при контактном нажатии $382<$ <3340 Н неустойчива при КЗ. Если по конструктивным соображениям контактное нажатие нельзя увеличить до 3440 Н, то надо либо переходить на розеточную или многопальцевую контактную систему, либо заменить медь на металлокерамику. Так, при использовании металлокерамики КМК-Б21 усилие 510 Н достаточно при ударном токе 76,6 кА [3.1].

Пример 2. Определить необходимое давление серебряных одноточечных контактов. Длительный ток 10 А. Ток КЗ 100 А.

Для надежной работы контактов согласно (3.8)

$$I_{ном}R_к\leqslant0{,}5U_{кi}.$$

Для серебра при $U_{кi}=0{,}09$ В (табл. 3.1), $U_{к,доп}=0{,}045$ В; $R_к=$ $=0{,}045/10=0{,}0045$ Ом.

Для одноточечного контакта при $R_к=k_1/P^{1/2}$ [формула (3.3)], $k_1=$ $=0{,}006$ (§ 3.1) $P=(k_1/R_к)^2=(0{,}006/0{,}0045)^2=1{,}68$ Н.

Для ориентировочного расчета можно принять, что условия непри-

варивания для серебряных контактов такие же, как и для медных, так как физические параметры материалов достаточно близки:

$$i_{уд} = 255 \text{ А}; \quad k_2 = 1300 \text{ (табл. 3.2)};$$
$$P = 255^2/(169 \cdot 10^4) = 0{,}0378 \text{ Н}.$$

Поскольку контактное нажатие по номинальному току $P_{ном} = 1{,}68$ Н больше контактного нажатия, определяемого по току КЗ $P_к = 0{,}0378$ Н, то выбираем нажатие $P_{ном} = 1{,}68$ Н.

Глава четвертая

ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большая группа электрических аппаратов представлена коммутационными устройствами, с помощью которых замыкается и размыкается электрическая цепь. Электрический разряд, возникающий при размыкании контактов, приводит к их износу и в значительной степени определяет надежность и долговечность аппарата. Этот разряд в окружающем контакт газе является либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой. Тлеющий разряд возникает при отключении тока менее 0,1 А при напряжении на контактах 250—300 В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле, а в более мощных аппаратах является переходной фазой к разряду в виде электрической дуги. Если ток и напряжение в цепи выше значений, указанных в табл. 3.3, то имеет место дуговой разряд, обладающий следующими особенностями:

1. Дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах. Минимальный ток дуги для различных материалов приведен в табл. 3.3 и для металлов составляет примерно 0,5 А.

2. Температура центральной части дуги очень велика и может достигать 6000—25 000 К.

3. При дуговом разряде плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает 10^2—10^3 А/мм^2.

4. Падение напряжение у катода составляет всего 10—20 В и практически не зависит от тока.

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околокатодную, область столба дуги и околоанодную. В каждой из этих областей процес-

сы ионизации и деионизации протекают по-разному.

а) **Околокатодная область.**

Занимает весьма небольшое пространство длиной не более 10^{-6} м. Около катода возникает положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между этим положительным объемным зарядом и катодом создается электрическое поле с напряженностью до 10^7 В/м, в котором движутся электроны, вышедшие из катода и создающие электрический ток. Электрическое поле воздействует на электроны, увеличивая их скорость. При соударении такого электрона с нейтральной частицей может произойти ионизация, для чего электрон должен обладать определенной энергией.

Напряжение U_i (разгоняющее напряжение), которое должен пройти электрон для приобретения энергии, необходимой для ионизации, называется *потенциалом ионизации*. Для газов этот потенциал колеблется от 24,58 В (гелий) до 13,3 В (водород). Пары металлов имеют значительно меньший потенциал ионизации. Так, для паров меди он равен 7,7 В.

Положительные ионы, так же как и электроны, разгоняются электрическим полем, но из-за большой массы скорость их много меньше. При ударе положительного иона о нейтральную частицу меньшая часть энергии передается на ионизацию, так что *ионизация толчком* происходит в основном за счет электронов.

Ввиду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, достаточной для ионизации ударом. Чаще всего после удара атом переходит в *возбужденное состояние* (электрон атома переходит на более удаленную от ядра орбиту). Для ионизации возбужденного атома требуется меньшая энергия. В результате необходимый потенциал ионизации уменьшается. Такая ионизация называется ступенчатой. При ступенчатой ионизации необходим многократный удар электронов по атому: на каждый образующийся положительный ион требуются десятки электронов. Поэтому ток около катода, несмотря на наличие положительных ионов, носит электронный характер.

Образующиеся электроны не создают около катода отрицательного объемного заряда, так как их скорость значительно больше скорости тяжелых положительных ионов. Положительные ионы разгоняются в поле катодного паде-

ния напряжения и бомбардируют катод. Благодаря этому температура катода поднимается и достигает точки испарения материала электрода. При высоких температурах появляется термоэлектронная эмиссия катода, которая в сильной степени зависит от температуры электрода. Проведенные исследования также показали, что дуга может существовать только за счет автоэлектронной эмиссии, создаваемой у катода электрическим полем.

б) **Область дугового столба.** Энергия, приобретенная заряженными частицами в электрическом поле дугового столба, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит.

При большой температуре, которая имеет место в области дугового столба, скорость частицы возрастает до значения, при котором удар в нейтральный атом приводит к его ионизации. Такая ионизация называется термической. Основным источником ионов и электронов в столбе дуги является термическая ионизация. Чем меньше масса частицы, тем больше ее скорость движения. Количество зарядов, появляющихся в результате термической ионизации, можно определить с помощью уравнения Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2}\,10^{-5}p = 315{,}8\,T^{2{,}5}e^{-11\,600U_i/T}\,10^{-8}, \qquad (4.1)$$

где x — степень ионизации, равная отношению числа ионизированных частиц к полному числу атомов в данном объеме; p — абсолютное давление газа, Па; T — абсолютная температура газа, К; U_i — потенциал ионизации, В.

Если $T=\text{const}$, то, учитывая, что $x^2 \ll 1$, можно получить

$$x \simeq 1/\sqrt{p}.$$

Таким образом, с ростом давления степень ионизации x уменьшается. В связи с этим во многих дугогасящих устройствах (ДУ) электрических аппаратов создается повышенное давление газа, что способствует гашению дуги. Очень сильное влияние на ионизацию оказывает температура. Для большого числа двухатомных газов из-за ступенчатой ионизации процесс образования ионов начинается при температурах $6\cdot10^3$ К. Пары металла ионизируются значительно легче. Заметная ионизация начинается уже при температурах 3000—4000 К. Поэтому в ДУ необходимы меры против попадания металлических паров электродов

в столб дуги (уменьшение сечения плавких вставок предохранителей, перемещение дуги по электродам, уменьшающее температуру электродов, а следовательно, их испарение, и др.).

Поскольку степень ионизации определяется температурой, во всех ДУ стремятся отводить тепло от дуги за счет либо охлаждения движущимся воздухом или газом (воздушные, масляные выключатели), либо отдачи тепла стенкам дугогасительной камеры.

В дуговом столбе наряду с ионизацией протекают процессы деионизации за счет *рекомбинации* и *диффузии.*

Рекомбинация — это нейтрализация частиц за счет соединения ионов с зарядами различных знаков. В дуговом столбе рекомбинация электрона и положительно заряженного иона из-за большого различия в их массе маловероятна. Обычно рекомбинация происходит так, что сначала электрон отрицательно заряжает нейтральную частицу, после чего происходит рекомбинация положительного и образовавшегося отрицательного ионов. Очевидно, что чем больше зарядов в единице объема, тем сильнее будет рекомбинация. Уменьшение числа зарядов за счет рекомбинации можно найти [4.1] с помощью уравнения

$$|dn/dt|_{\text{р}} = \alpha n^2, \tag{4.2}$$

где $|dn/dt|_{\text{р}}$ — скорость уменьшения числа зарядов в результате рекомбинации; α — коэффициент рекомбинации; n — число ионов одного знака (в стационарном режиме число положительных и отрицательных ионов в столбе дуги одинаково).

Коэффициент рекомбинации зависит от рода газа, давления и температуры. При спадании температуры коэффициент рекомбинации сильно возрастает. Ориентировочно можно считать, что коэффициент рекомбинации обратно пропорционален абсолютной температуре в третьей степени.

Деионизация в столбе идет также за счет *диффузии.* Вследствие теплового движения частиц происходит выравнивание плотности заряженных частиц, число частиц в столбе дуги уменьшается, сопротивление дугового столба увеличивается.

Из теории диффузии газов известно, что скорость убывания числа частиц пропорциональна их количеству:

$$|dn/dt|_{\text{д}} = 2Dn/r^2, \tag{4.3}$$

где $|dn/dt|_д$ — скорость убывания частиц за счет диффузии; n — число заряженных частиц одного знака; r—радиус столба дуги; $D=\lambda v/3$ — коэффициент диффузии; λ — длина свободного пробега иона; v — средняя скорость движения иона.

Анализ (4.3) показывает, что скорость убывания числа заряженных частиц резко возрастает с уменьшением r. Поэтому в ДУ широко используется принцип узкой щели, образованной дугостойкими стенками с высокой теплопроводностью.

При этом столб дуги деформируется стенками ДУ, а его сечение приобретает прямоугольную форму. Суммируя результаты ионизационных процессов в дуге, можно записать

$$dn/dt = |dn/dt|_т - |dn/dt|_р - |dn/dt|_д, \qquad (4.4)$$

где $|dn/dt|_т$ — скорость возникновения зарядов за счет термической ионизации.

Для стабильно горящей дуги, сопротивление которой неизменно при данном токе, $dn/dt=0$, т. е. скорость роста числа ионизированных частиц равна скорости их исчезновения. Устанавливается динамический баланс. В случае погасания дуги $dn/dt<0$. Зарядов, которые образуются при ионизации, меньше, чем исчезает при деионизации.

Очевидно, что при переходе к большему току вначале $dn/dt>0$. Затем устанавливается динамический баланс $dn/dt=0$, соответствующий этому значению тока.

в) **Энергетический баланс дуги.** Процесс ионизации и процесс деионизации в значительной степени определяются температурой дугового промежутка. Последняя зависит от количества тепла, выделяемого в дуге и отводимого от дуги.

Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

Для открытой дуги, горящей в воздухе, излучением отдается 15—30 % выделяемой в дуге энергии. Для дуги, горящей в закрытом ДУ, доля тепла, отдаваемого лучеиспусканием, меньше.

Отвод тепла за счет теплопроводности газа в значительной степени зависит от его температуры. Так, при температуре 4000 К молекулы водорода диссоциируют на атомы. При этом от дуги отводится большое количество тепла. Внешне этот процесс представляется как резкое увеличение теплопроводности. Теплопроводность газа сильно

зависит от его природы. Так, средняя теплопроводность водорода в 17 раз больше, чем воздуха. Благодаря своей высокой теплопроводности при прочих равных условиях водород способствует более быстрому охлаждению столба дуги. Ток, отключаемый в атмосфере водорода, в 7,5 раза больше, чем в воздухе при том же давлении.

При горении дуги в трансформаторном масле последнее разлагается с выделением водорода, что способствует эффективному гашению дуги. В некоторых аппаратах под действием магнитного поля дуга перемещается с большой скоростью относительно воздуха, что приводит к ее охлаждению за счет конвекции. Этот вид теплоотдачи наряду с теплопроводностью является определяющим для процесса гашения.

г) **Околоанодная область.** Поток электронов из столба дуги устремляется к положительному электроду — аноду. Анод при дуговом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается отрицательный объемный заряд, что и вызывает появление околоанодного падения напряжения и повышение напряженности электрического поля. Околоанодное падение напряжения зависит от температуры анода, его материала и значения тока.

Электроны разгоняются в поле, образованном отрицательным объемным зарядом и анодом. Энергия, приобретенная электронами, отдается аноду. Благодаря большой энергии электронов анод нагревается до очень высокой температуры, которая, как правило, выше температуры катода. Мощный поток электронов выбивает из анода электроны, которые также участвуют в создании отрицательного объемного заряда.

Высокая температура анода и околоанодная область не оказывают существенного влияния на возникновение и условия существования дугового разряда. Роль анода сводится к приему электронного потока из дугового столба.

Для дуги большого тока околоанодное падение напряжения столь мало, что им можно пренебречь.

Распределение напряжения, напряженности электрического поля (градиента) $E_{\text{п}}=dU/dx$ и производной d^2U/dx^2, пропорциональной объемному заряду σ в дуге, представлено на рис. 4.1.

Падение напряжения у катода составляет 10—20 В и зависит от материала катода и свойств газа, в котором горит дуга. Околокатодное падение напряжения несколько мень-

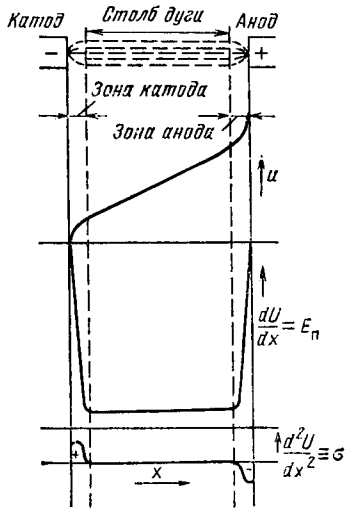


Рис. 4.1. Распределение напряжения, напряженности электрического поля и объемных зарядов в электрической дуге

ше потенциала ионизации газа из-за наличия около катода его паров, у которых потенциал ионизации значительно ниже.

В области дугового столба положительные и отрицательные объемные заряды уравновешивают друг друга и результирующий заряд равен нулю. Градиент напряжения на дуге остается постоянным и для дуги, свободно горящей в воздухе, составляет $(2 \div 3) \cdot 10^3$ В/м. В ДУ градиент напряжения сильно возрастает, достигая $(2 \div 3) \cdot 10^4$ В/м.

Околоанодное падение напряжения составляет 5—10 В. При больших токах околоанодное напряжение уменьшается, в то время как околокатодное напряжение остается постоянным.

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у катода и анода. Такие дуги называются короткими. Условия гашения короткой дуги в значительной степени определяются процессами, происходящими у электродов, и условиями их охлаждения.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше околоэлектродных, и последними можно пренебречь. Условия существования таких дуг, называемых длинными, определяются процессами в столбе дуги.

4.2. ДУГА ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) **Статическая вольт-амперная характеристика.** Важнейшей характеристикой дуги является вольт-амперная (ВАХ), представляющая собой зависимость напряжения на дуге от тока. С ростом тока i увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает

число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги $r_д$.

Напряжение на дуге равно $ir_д$. При увеличении тока сопротивление дуги $r_д$ уменьшается так резко, что напряжение на ней падает, несмотря на рост тока. Каждому значению тока в установившемся режиме соответствует свой динамический баланс числа заряженных частиц. При большем значении тока увеличивается количество возникающих зарядов. Однако при этом возрастает число исчезающих зарядов, так что результирующая скорость изменения числа заряженных частиц при новом значении тока равна нулю.

При переходе от одного значения тока к другому тепловое состояние дуги не изменяется мгновенно. Электрическая дуга обладает тепловой инерцией. Если ток изменяется во времени медленно, то тепловая инерция разряда не сказывается. Каждому значению тока соответствует определенное значение сопротивления дуги или напряжения на ней.

ВАХ дуги, снятая при медленном изменении тока, называется статической.

Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов, параметров среды и условий охлаждения. Напряжение на дуге $u_д$ можно рассматривать как сумму околоэлектродных падений напряжения $u_э$ и падения напряжения в столбе дуги:

$$u_д = u_э + E_п l, \tag{4.5}$$

где $E_п$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; l — длина столба дуги.

Величина $E_п$ зависит от тока и условий горения дуги. Статические ВАХ дуги изображены на рис. 4.2. Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая ВАХ. С ростом давления среды, в которой горит дуга, также увеличивается напряженность $E_п$ и ВАХ поднимается так же, как показано на рис. 4.2.

Охлаждение дуги существенно влияет на ВАХ. Чем интенсивнее охлаждение дуги, тем большая мощность от нее отводится. При этом должна возрасти мощность, выделяемая дугой. Поскольку при заданном токе это возможно за счет увеличения напряжения на дуге, то ВАХ поднимается, что широко используется в ДУ.

б) **Условия стабильного горения и гашения дуги.** Рас-

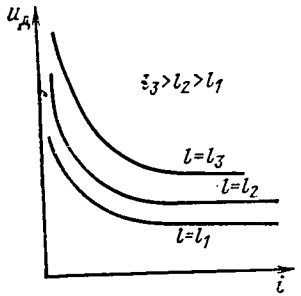


Рис. 4.2. Статические вольт-амперные характеристики дуги при различной ее длине

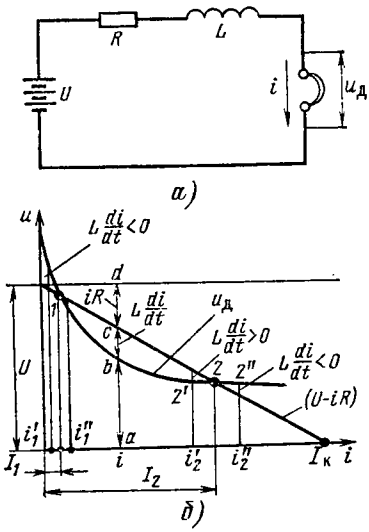


Рис. 4.3. Баланс напряжений в электрической цепи при наличии дуги

смотрим баланс напряжений в цепи (рис. 4.3, *а*) при дуге неизменной длины

$$U = iR + Ldi/dt + u_д. \qquad (4.6)$$

В стационарном режиме ток в цепи не меняется и $di/dt = 0$. На рис. 4.3, *б* совместно с ВАХ дуги построена прямая $U—iR = f(i)$.

Для тока i отрезок ab соответствует напряжению на дуге, отрезок cd — падению напряжения на резисторе R и отрезок bc соответствует Ldi/dt. Очевидно, что в точках *1* и *2* $Ldi/dt = 0$. В этих точках возможен стационарный режим. Рассмотрим более подробно равновесие напряжений вблизи этих точек. Если по каким-либо причинам напряжение источника питания снизится, то точка равновесного состояния перейдет в *2'*, при этом ток уменьшится до значения i_2', определяемого пересечением ВАХ с прямой $U'—iR$.

Пусть теперь напряжение источника восстановится до прежней величины U. Для тока i_2' отрезок $U—iR > u_д$, поэтому в этой точке $Ldi/dt > 0$. Таким образом, при токе i_2' на индуктивности возникает напряжение $Ldi/dt > 0$, кото-

рое увеличивает ток (производная положительна у растущей во времени величины).

Процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение $Ldi/dt=0$, т. е. рабочая точка попадет в точку *2*.

Пусть по каким-либо причинам, например из-за роста напряжения источника, $i_2'' > I_2$. Если напряжение вернется к старому значению, то возникнет напряжение $Ldi/dt<0$. При этом ток i_2'' будет уменьшаться, пока не станет равным току I_2. Точка *2* является точкой устойчивого равновесия: при выходе из нее возникают процессы, которые возвращают состояние цепи снова в эту точку.

Теперь рассмотрим процесс изменения тока около точки *1*. Пусть $i_1' < I_1$, в этом случае возникнет напряжение $Ldi/dt<0$, и ток в цепи будет убывать до тех пор, пока дуга не погаснет. Если $i_1'' > I_1$, то возникнет напряжение $dLi/dt> >0$. Ток будет возрастать до значения I_2.

Таким образом, точка *1* является точкой неустойчивого равновесия: при выходе из нее ток в цепи либо становится равным I_2, либо дуга гаснет и ток становится равным нулю.

В электрических аппаратах принимаются все меры к тому, чтобы дуга гасла в минимально короткое время. Очевидно, для гашения дуги при всех значениях тока должно быть $Ldi/dt<0$. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы

$$u_д > U - iR. \tag{4.7}$$

Это возможно за счет либо поднятия ВАХ, либо увеличения сопротивления цепи. ВАХ дуги может быть поднята в результате увеличения длины дуги, интенсивного охлаждения и повышения давления среды, в которой горит дуга.

При замкнутых контактах дуга отсутствует, и ток в цепи равен $I_к=U/R$. При разведении контактов между ними возникнет дуга с током I_2. Если длина дуги и напряжение источника неизменны, то при увеличении сопротивления ток в цепи будет уменьшаться, принимая значения i_3, i_4, $I_{кр}$ (рис. 4.4). При дальнейшем возрастании сопротивления соблюдается неравенство $u_д>U—iR$, т. е. создаются условия для гашения дуги. Токи и сопротивления, при которых наступают условия для гашения дуги, называются критическими.

Если при неизменном значении тока цепи $I_к$ увеличить напряжение питания U или при неизменном значении на-

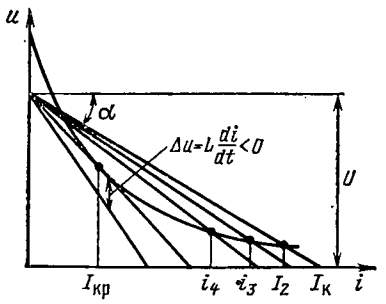


Рис. 4.4. Ток в цепи при различных сопротивлениях R и наличии дуги

пряжения U увеличить ток цепи $I_к$, то прямая $U—iR$ будет проходить выше. Тогда для соблюдения условий гашения дуги (4.7) необходимо поднять ВАХ дуги. Таким образом, с ростом отключаемого тока и напряжения источника условия отключения утяжеляются.

Анализ рис. 4.4 показывает, что за счет изменения сопротивления R можно снять статическую ВАХ только при токе $i \geqslant I_{кр}$. Чтобы снять эту ВАХ при меньших токах, необходимо увеличить напряжение источника питания.

Определим длительность горения дуги $t_д$. Обозначим

$$\Delta u = |Ldi/dt|,$$

откуда получим

$$t_д = L \int_{I_к}^{0} \frac{di}{\Delta u}.$$

Таким образом, чем больше Δu, тем меньше длительность горения дуги, но больше напряжение на контактах в момент гашения.

в) **Перенапряжения при отключении дуги постоянного тока.** Напряжение на контактах в момент достижения током нулевого значения называется напряжением гашения дуги. При $i=0$ (4.6) имеет вид

$$U = Ldi/dt + u_{гаш}; \tag{4.8}$$

$$u_{гаш} = U - Ldi/dt. \tag{4.9}$$

Так как $Ldi/dt<0$, можно написать

$$u_{гаш} = U + |Ldi/dt|_{i=0}. \tag{4.10}$$

Таким образом, в момент гашения дуги напряжение на

контактах равно сумме напряжения источника и модуля напряжения на индуктивности. Увеличение напряжения на контактах относительно напряжения U источника питания называется перенапряжением. Чем больше индуктивность и скорость спада тока в момент гашения, тем больше перенапряжение. Скорость спада тока di/dt зависит от скорости роста сопротивления дугового промежутка и скорости его деионизации. Поэтому в быстродействующих аппаратах, отключающих цепь постоянного тока за сотые доли секунды, возможны большие перенапряжения.

Следует отметить, что чем больше индуктивность цепи, тем меньше скорость спада тока при прочих равных условиях (см. рис. 4.7). Для оценки перенапряжения вводится понятие коэффициента перенапряжений

$$k = \frac{u_{\text{гаш}}}{U} = 1 + \frac{|Ldi/dt|_{i=0}}{U}.$$

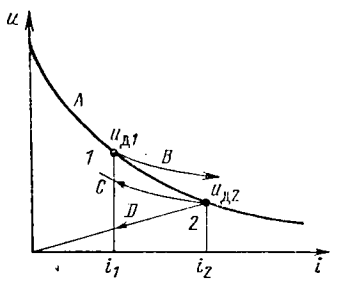


Рис. 4.5. Статическая A и динамическая B—D вольт-амперные характеристики дуги

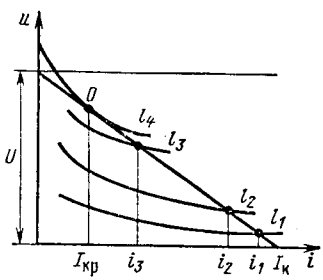


Рис. 4.6. Процесс отключения при переменной длине дуги

Следует отметить, что напряжение Ldi/dt приложено к индуктивности отключаемой нагрузки. Это напряжение может в десятки раз превышать номинальное напряжение источника и приводить к пробою изоляции нагрузки. Для ограничения перенапряжений при отключении больших индуктивностей (обмотки возбуждения крупных генераторов) применяются устройства с дугогасительной решеткой (§ 4.11).

г) **Динамическая вольт-амперная характеристика дуги.** Если ток в цепи изменяется медленно, то току i_1 соответствует сопротивление дуги $r_{д1}$, а току $i_2 > i_1$ — сопротивление $r_{д2} < r_{д1}$ (см. кривую A на рис. 4.5).

В реальных установках ток может меняться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции дугового столба изменение сопротивления дуги отстает от изменения тока. Вольт-амперная характеристика дуги при быстром изменении тока называется динамической.

При возрастании тока динамическая ВАХ идет выше статической (кривая *B*), так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении — ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая *C*).

Динамическая ВАХ в значительной степени зависит от скорости изменения тока в дуге. Если в цепь ввести большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то во время спада тока до нуля сопротивление дуги останется постоянным. В этом случае динамическая ВАХ изобразится прямой, проходящей из точки *2* в начало координат (прямая *D*), т. е. дуга ведет себя как металлический проводник и напряжение на дуге пропорционально току.

В реальном аппарате после размыкания контактов расстояние между ними меняется и дуга имеет переменную длину. Разобъем путь, который проходит контакт, на участки l_1—l_4 и нанесем статические ВАХ, соответствующие концу каждого участка (рис. 4.6). Если индуктивность цепи мала, то по мере увеличения длины дуги ток будет быстро принимать значения, соответствующие точке пересечения статических ВАХ с прямой U—iR.

В точке *O* ток достигнет критического значения. При дальнейшем увеличении длины дуги наступят условия гашения.

Длина дуги, при которой статическая характеристика касается прямой U—iR, называется критической. После точки *O* ток быстро уменьшается до нуля и дуга гаснет.

В цепи с большой индуктивностью спадание тока замедляется; ВАХ дуги сразу же после расхождения контактов поднимается выше прямой U—iR. В момент гашения дуги возможны большие перенапряжения.

Типичные осциллограммы отключения цепей с малой и большой индуктивностью, приведены на рис. 4.7. При отключении индуктивной цепи процесс гашения затягивается и на контактах появляется перенапряжение $|Ldi/dt|_{t=0}$ (рис. 4.7, *а*). При отключении с $L \approx 0$ (активная нагрузка)

гашение дуги происходит быстро и перенапряжения отсутствуют (рис. 4.7, *б*).

д) **Энергия, выделяемая в дуге при гашении.** Умножив обе части (4.6) на idt и проинтегрировав полученное выражение, будем иметь

$$\int_0^t uidt = \int_0^t i^2 Rdt + \int_0^t u_д idt + \int_{i_к}^0 Li\,di. \qquad (4.11)$$

После преобразования (4.11) получим

$$A_д = \int_0^{t_д} u_д idt = \int_0^{t_д} uidt - \int_0^{t_д} i^2 Rdt + LI_к^2/2, \qquad (4.12)$$

где $A_д$ — энергия, выделенная в дуге в процессе гашения; $t_д$ — время гашения дуги; $I_к$ — ток в цепи при замкнутых контактах; L — индуктивность цепи.

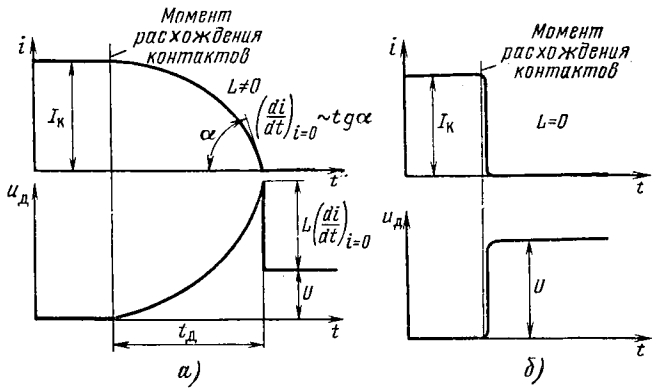


Рис. 4.7. Процесс отключения цепи постоянного тока, содержащей большую (*а*) и малую (*б*) индуктивность

Анализ (4.12) показывает, что в дуговом промежутке выделяется вся энергия, полученная от источника питания за вычетом потерь в активном сопротивлении R, и вся электромагнитная энергия, накопленная в отключаемой цепи. Результаты опытов показывают, что для всех аппаратов с ДУ энергия, поступающая в дугу от источника питания, составляет всего 3—5 % энергии дуги. Остальная часть, 97—95 %, приходится на электромагнитную энергию отключаемого контура.

Энергия, выделяемая в дуге, тратится частично на нагревание разряда и частично отдается окружающему пространству. Для гашения дуги необходимо, чтобы температура разряда уменьшалась, т. е. чтобы количество энергии, подводимой к дуге, было меньше количества тепла, отводимого от нее. При отключении цепи с большой индуктивностью выделяемую в дуге электромагнитную энергию необходимо отвести охлаждением. В связи с этим чем больше индуктивность цепи и отключаемый ток, тем труднее отключить цепь.

Если цепь чисто активная, то дуга горит до тех пор, пока напряжение на дуге не достигнет напряжения источника питания. Энергия, выделенная в дуге,

$$A_д = \int_0^{t_д} ui\,dt - \int_0^{t_д} i^2 R dt.$$

Эта энергия выделяется в дуге как в чисто активном сопротивлении и равна разности энергии, выделенной источником и энергии потерь в резисторе R.

4.3. ДУГА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ

При частоте 50 Гц ток в дуге меняется достаточно быстро, и происходящие в ней процессы необходимо рассматривать с помощью динамической ВАХ. При синусоидальном токе напряжение на дуге (рис. 4.8, *а*) сначала поднимается до точки *1*, затем в связи с ростом тока падает до точки

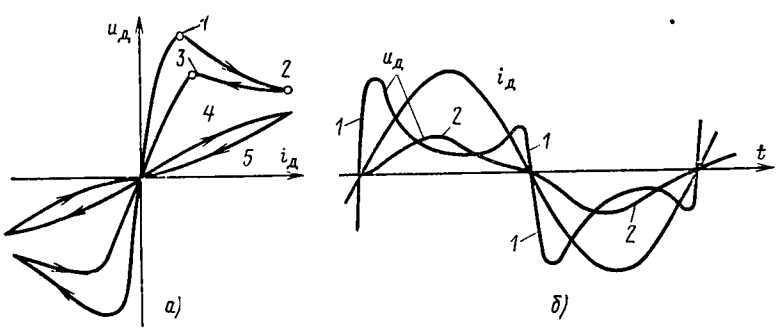


Рис. 4.8. Динамические характеристики дуги переменного тока

2. После прохождения тока через максимум динамическая ВАХ поднимается и проходит через точку *3* в связи с уменьшением тока. В отрицательный полупериод процесс повторяется. При высокой частоте тока динамическая ВАХ описывается кривыми *4* и *5*. Зависимости изменения тока в дуге и напряжения на ней во времени представлены на рис. 4.8, *б*. При высокой частоте форма напряжения на дуге (кривая *2*) приближается к форме тока.

Рассмотрим отключение цепи с чисто активной нагрузкой ($\cos\varphi=1$). Пусть контакты аппарата разошлись в точке *а* (рис. 4.9) и между ними загорелась дуга. К концу по-

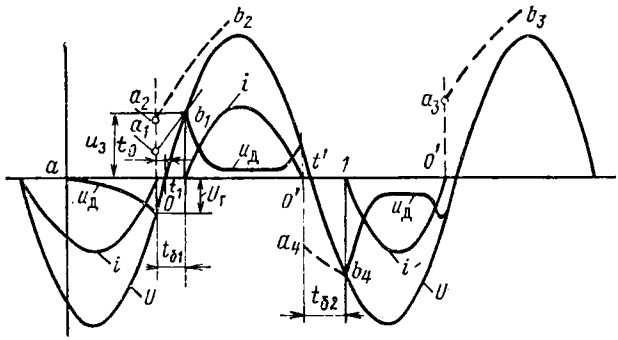


Рис. 4.9. Процесс отключения активной нагрузки переменного тока

лупериода из-за уменьшения тока и воздействия ДУ сопротивление дугового промежутка и напряжение на дуге увеличиваются. При подходе тока к нулю к дуге подводится малая мощность, температура ее уменьшается, что, с одной стороны, ведет к замедлению термической ионизации, с другой — способствует деионизации. Все это приводит к погасанию дуги. Напряжение, при котором дуга гаснет, называется напряжением или пиком гашения $U_г$. Резкий рост напряжения к концу полупериода ведет к тому, что ток в цепи обрывается до своего естественного прохождения через нуль.

В процессе гашения дуги число заряженных частиц в области дугового промежутка уменьшается, и его сопротивление после гашения дуги резко возрастает. При этом возрастает и электрическая прочность промежутка, т. е. напряжение, при котором происходит его электрический пробой.

После прохождения напряжения через нуль электрическая прочность промежутка начинает нарастать не с нуля, а со значения, соответствующего точке a_1 (начальная прочность промежутка). Начальная прочность и дальнейший рост прочности зависят от свойств ДУ. Чем эффективнее ДУ, тем больше начальная прочность и круче идет ее нарастание.

Пусть электрическая прочность промежутка восстанавливается по кривой a_1b_1. Тогда в момент времени t_1 эта кривая пересечется с кривой напряжения на промежутке и дуга загорится вновь. Напряжение $u_з$ называется напряжением зажигания.

Напряжение, появляющееся на контактах после прохождения тока через нуль, называется восстанавливающимся. Оно зависит от напряжения источника и параметров отключаемой цепи. В данном случае при чисто активной цепи ($\cos\varphi=1$) после прохождения тока через нуль к контактам приложено синусоидальное напряжение источника.

В точке O' дуга вновь гаснет, и происходят процессы, аналогичные описанным ранее. В этой точке при подходе тока к нулю дуга имеет более высокую температуру по сравнению с температурой к концу бестоковой паузы $t_{б1}$. Поэтому всегда пик гашения дуги меньше пика зажигания.

К моменту O' вследствие расхождения контактов длина дуги возрастает и увеличивается интенсивность воздействия ДУ. В результате и начальная прочность промежутка и крутизна ее нарастания в точке O' больше, чем в точке O (кривая a_4b_4). Поэтому пауза тока $t_{б2}$ увеличивается по сравнению с $t_{б1}$. Однако и в этом нуле тока гашение дуги не произошло, и она загорелась вновь. Из-за возросшей длины дуги вследствие расхождения контактов напряжение на дуге в этом полупериоде больше, чем в предыдущем. Окончательное гашение дуги происходит в точке O''. Для случая, когда электрическая прочность промежутка растет по кривой a_2b_2, гашение дуги происходит при первом же прохождении тока через нуль.

Следует отметить, что в эффективно работающих ДУ напряжение на дуге во времени меняется согласно рис. 4.10. В области нуля тока происходит интенсивное охлаждение дуги, в результате чего возрастает пик гашения $u_г$ (увеличивается сопротивление дуги) и нарастает электрическая прочность (увеличивается пик зажигания $u_з$). На протяжении большей части полупериода напряжение на дуге не меняется во времени [4.1]. В некоторых ДУ после возник-

новения дуги ее сопротивление так быстро возрастает, что ток в цепи начинает уменьшаться за счет этого сопротивления и не достигает установившегося значения (на постоянном токе) и амплитуды (на переменном токе). Такой процесс отключения называется процессом с токоограничением.

4.4. ОТКЛЮЧЕНИЕ ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим процесс гашения дуги в цепи с большой индуктивностью ($\cos\varphi \leqslant 0{,}1$). В момент расхождения контактов (МРК) загорается дуга (рис. 4.10) и напряжение на дуге изменяется во времени так же, как на рис. 4.9. В момент времени $t=0$ дуга гаснет. Благодаря процессу деионизации в ДУ электрическая прочность промежутка увеличи-

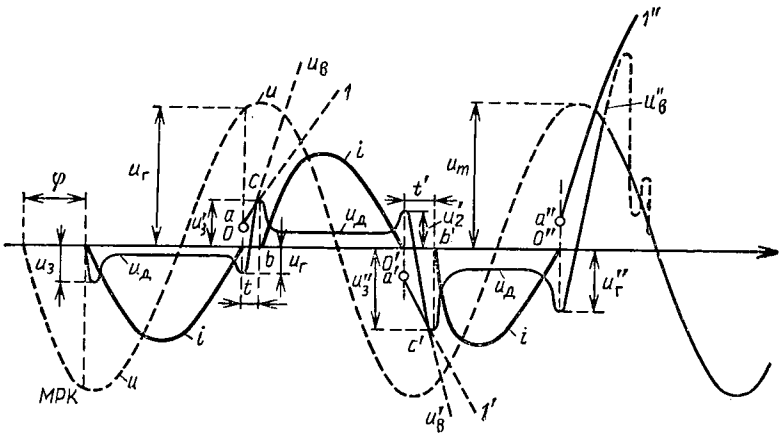


Рис. 4.10. Отключение индуктивной нагрузки переменного тока

вается по кривой a—1. К промежутку прикладывается восстанавливающееся напряжение на контактах $u_в$, создаваемое источником. Данный случай принципиально отличается от предыдущего тем, что в момент погасания дуги ЭДС источника близка к амплитуде. При этом напряжение на промежутке восстанавливается с большой скоростью. В точке c прочность промежутка ниже восстанавливающегося на нем напряжения и происходит пробой. Дуга горит еще полпериода и снова гаснет в точке O'. В точке c' снова происходит пробой междуконтактного промежутка, так как после

момента времени b' кривая электрической прочности $a'—1'$ ниже кривой восстанавливающегося напряжения $u'_в$. При этом загорается дуга, которая гаснет в точке O'', и снова начинается процесс нарастания электрической прочности (кривая $a''—1''$) и восстановления напряжения $u''_в$. После точки O'' благодаря эффективному действию ДУ кривая восстанавливающейся электрической прочности $a''—1''$ идет выше кривой восстанавливающегося напряжения $u''_в$ и происходит окончательное гашение дуги.

Для расчета восстанавливающегося напряжения составим схему замещения (рис. 4.11, *а*, *б*), в которой: L — индуктивность, соответствующая реактивному сопротивлению КЗ источника $X_к = \omega L$; R — активное сопротивление цепи; $C_{эк}$ — эквивалентная емкость на зажимах выключателя. Эта емкость определяется емкостью источника питания, коммутирующего электрического аппарата C и токоподводящих шин относительно земли $C_з$. Емкость источников питания (обмотки генераторов, трансформаторов) является распределенной. Для упрощения расчетов от распределенной емкости переходят к сосредоточенной, которая вместе с индуктивностью L дает частоту f_0, равную частоте первой гармоники реальных обмоток.

Положим, что напряжение на дуге во время ее горения очень мало и им можно пренебречь (сопротивление дуги равно нулю) и что после гашения дуги сопротивление ее стало сразу бесконечно большим. Дуга с такой характеристикой

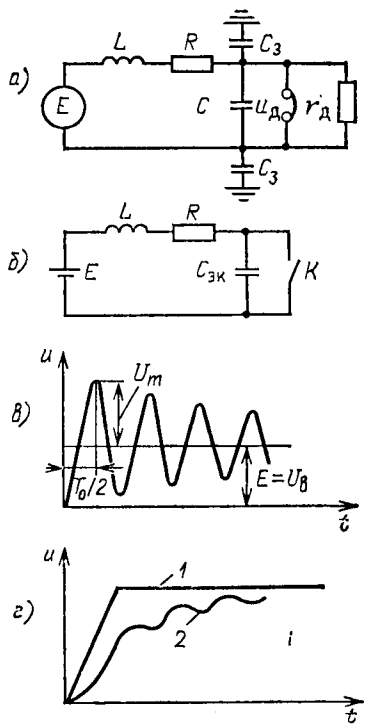


Рис. 4.11. К расчету восстанавливающегося напряжения:

а — электрическая схема отключения цепи; *б* — схема замещения; *в* — восстанавливающееся напряжение на контактах; *г* — огибающая кривой допустимого восстанавливающегося напряжения (*1*) и восстанавливающееся напряжение в месте установки выключателя (*2*)

называется идеализированной. Тогда процесс изменения напряжения на контактах можно представить так: при горении дуги емкость $C_э$ закорочена и напряжение на ней равно нулю. После прохождения тока через нуль дуга гаснет и начинается заряд емкости $C_э$ от источника E через индуктивность L и сопротивление R. Так как $\cos\varphi$ близок к нулю, можно считать, что мгновенное значение ЭДС источника в момент прохождения тока через нуль (мгновенное возвращающееся напряжение) равно амплитуде ЭДС (рис. 4.11, *в*).

Длительность переходного процесса восстановления напряжения много меньше полупериода промышленной частоты. Поэтому можно принять для данного момента времени, что схема питается от источника постоянной ЭДС E (рис. 4.11, *б*). Когда дуга горит, контакт K замкнут и напряжение на дуге $u_C=0$. При прохождении тока через нуль дуга гаснет и ее сопротивление $r_д=\infty$, что равносильно размыканию контакта K. После размыкания K начинается процесс заряда емкости $C_{эк}$ через R и L от источника E. Из-за наличия сопротивления R этот процесс (рис. 4.11, *в*) носит затухающий характер. Восстанавливающееся напряжение на емкости меняется по закону

$$u = E\left(1 - e^{-pt}\cos\omega_0 t\right), \qquad (4.13)$$

где E — ЭДС источника в момент нуля тока; p — коэффициент затухания, равный $R/(2L)$; ω_0 — собственная угловая частота контура $RLC_э$, практически равная $1/\sqrt{LC_э}$.

В действительности процесс гашения дуги и восстановления напряжения идет сложнее. Когда дуга горит, то ее сопротивление $r_д$ мало. После прохождения тока через нуль подвод мощности к дуге прекращается и благодаря ДУ сопротивление дугового промежутка $r_д$ возрастает. В этот же момент времени к промежутку приложено восстанавливающееся напряжение $u_в$ и через сопротивление $r_д$ течет ток, который называется остаточным $i_{ост}=u_в/r_д$. В дуге выделяется мощность $P_д=i^2_{ост}\,r_д$. Если отводимая от дуги с помощью ДУ мощность $P_{отв}>P_д$, то дуга продолжает охлаждаться, ее сопротивление увеличивается и процесс гашения заканчивается успешно. Если $P_д>P_{отв}$, происходит разогрев столба дуги, ее сопротивление $r_д$ падает и происходит пробой. Поэтому под электрической прочностью следует понимать такое напряжение на дуге, при котором $P_д=P_{отв}$:

$$u_д = \sqrt{P_{отв}\,r_д}.$$

Сопротивление $r_д$, будучи включенным параллельно конденсатору $C_{эк}$, дополнительно демпфирует процесс восстановления напряжения. Чем меньше сопротивление $r_д$ (рис. 4.11, *а*), тем большее затухание имеет кривая восстанавливающегося напряжения. Как правило, угловая частота колебаний ω_0 мало зависит от реальных значений R и $r_д$, которые в основном сказываются на коэффициенте затухания. Если положить, что $r_д$=const, то коэффициент затухания $p=\frac{1}{2}\frac{R}{L}+\frac{1}{r_д C}$. Для характеристики сети с точки зрения восстанавливающегося напряжения принимают $r_д=\infty$. Следует отметить, что рассчитать зависимость $r_д(t)$ исключительно трудно, и об этом сопротивлении чаще судят по результатам испытаний.

4.5. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

При гашении дуги переменного тока как низкого, так и высокого напряжения одним из решающих факторов является восстанавливающееся напряжение. Для оценки кривой восстанавливающегося напряжения вводится понятие скорости нарастания этого напряжения.

Для схемы рис. 4.11, *а* средняя скорость восстанавливающегося напряжения приближенно, если пренебречь затуханием, может быть найдена по формуле

$$v_{ср}=\frac{du}{dt_{ср}}=\frac{2U_в}{T_0/2}=4\frac{U_в}{T_0}=4U_в f_0, \qquad (4.14)$$

где $U_в$ — мгновенное значение ЭДС источника в момент нуля тока (возвращающееся напряжение); $T_0/2$ — полупериод собственных колебаний восстанавливающегося напряжения, в течение которого напряжение достигает максимального пика, равного $2U_в$; f_0 — собственная частота колебаний.

Очевидно, что чем больше f_0 и возвращающееся напряжение промышленной частоты $U_в$, тем выше скорость восстановления напряжения. С ростом скорости восстановления напряжения необходимо увеличивать скорость нарастания электрической прочности междуконтактного промежутка. В противном случае либо увеличивается длительность горения дуги, либо аппарат вообще не сможет отключить цепь. Скорость нарастания обычно очень велика и измеряется в вольтах за 1 мкс. Восстанавливающееся напряжение часто оценивается собственной частотой f_0 и коэффициентом

пика $K_а$, который определяется отношением максимального пика к возвращающемуся напряжению промышленной частоты:

$$K_а = \frac{U_m}{U_в} = \frac{U_в\left(1 - e^{-p\pi/\omega_0}\cos\omega_0\frac{\pi}{\omega_0}\right)}{U_в} = 1 + e^{-p\pi/\omega_0}, \quad (4.15)$$

где $U_m = K_а U_в$ — амплитуда восстанавливающегося напряжения.

В высоковольтных выключателях $K_а = 1{,}4 \div 1{,}5$ и уменьшается с ростом отключаемого тока. В низковольтных аппаратах он ниже.

Собственная частота f_0 определяется индуктивностью L и эквивалентной емкостью $C_{эк}$, которые зависят от мощности КЗ цепи, номинального напряжения сети, номинальной мощности установки, конструктивного исполнения ее элементов и линий передачи [1.4].

Индуктивность L и эквивалентная емкость $C_{эк}$, как правило, растут с увеличением номинального напряжения, а потому собственная частота f_0 с ростом этого напряжения уменьшается. Однако скорость восстановления напряжения, пропорциональная номинальному напряжению сети (4.14), может быть достаточно высокой. Необходимо отметить, что мгновенное значение возвращающегося напряжения $U_в$ зависит от угла сдвига фаз $\varphi_к$ между током КЗ и напряжением источника при КЗ, а именно:

$$U_в = E \sin \varphi_к.$$

Для чисто индуктивной цепи $\varphi_к = \pi/2$ и $U_в = E$.

Для чисто активной цепи $\varphi_к = 0$ и $U_в = 0$.

После прохождения тока через нуль в активной цепи напряжение на промежутке меняется по синусоидальному закону, определяемому ЭДС источника.

Таким образом, отключение чисто активной цепи происходит значительно легче, чем индуктивной.

Для оценки условий восстановления напряжения вводятся огибающие прямые, касательные к кривой восстанавливающего напряжения (рис. 4.11, *г*) [3.1]. Здесь ломаная линия *1* — огибающая значений восстанавливающегося напряжения по ГОСТ 687-78, кривая *2* — восстанавливающееся напряжение в месте установки выключателя. Кривая *2* не должна пересекать ломаную *1*.

Остановимся на особенностях отключения трехфазной

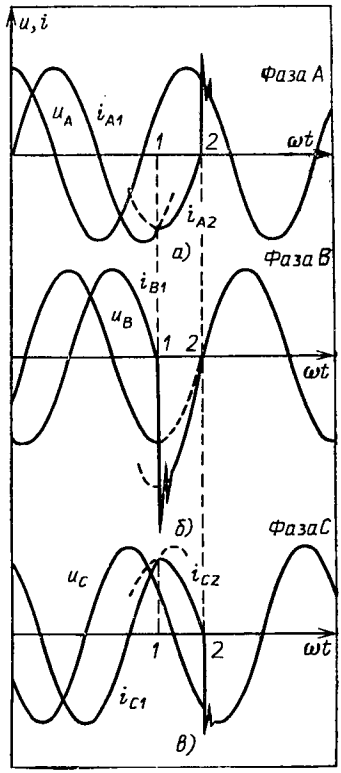


Рис. 4.12. Токи и напряжения на контактах идеального выключателя в процессе отключения трехфазной цепи

цепи. При трехфазном КЗ в полюсах выключателя текут токи, сдвинутые по фазе на 120°. Поэтому гашение дуги не может произойти одновременно во всех трех фазах. Осциллограмма процесса отключения показана на рис. 4.12. Допустим, что в фазе B при прохождении тока через нуль создались условия для гашения дуги. Для этого момента времени токи фаз A и C отличны от нуля и дуга в этих фазах погашена быть не может. После отключения фазы B трехфазная система токов I_A, I_B, I_C превращается в однофазную, причем в фазе A полупериод тока увеличивается, а в фазе B уменьшается. В точке *2* оба тока проходят через нуль, и происходит отключение тока в этих фазах. Можно показать, что если нулевая точка заземлена только в одном месте (у источника или в месте КЗ), то восстанавливающееся напряжение промышленной частоты

$$U_B = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}}\sqrt{2}\cdot 1{,}5 = 1{,}23U_{\text{ном}};$$

$$U_A = U_C = U_{\text{ном}}\sqrt{2}/2 = 0{,}707\,U_{\text{ном}}$$

(см. пример § 4.12). Таким образом, условия гашения дуги для первой отключающей фазы намного тяжелее, чем для оставшихся двух других фаз.

Для случаев трехфазных КЗ отношение возвращающегося напряжения на первом гасящем дугу полюсе к наибольшему фазному напряжению называется коэффициентом первого гасящего полюса $K_{\text{п.г}}$. Для фазы B коэффици-

ент $K_{п,г}=1{,}5$. Коэффициент $K_{п,г}$ зависит от контура КЗ и колеблется от 0,5 до 2 [3.1]. Возвращающееся напряжение определяется уравнением

$$U_в = \frac{U_{наиб,н}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \sin \varphi_к K_{п,г},$$

где $U_{наиб,н}$ — наибольшее допустимое значение линейного напряжения системы.

Как правило, если в коммутационных электрических аппаратах обеспечивается отключение первой фазы, то отключаются и оставшиеся две.

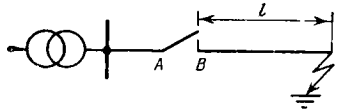


Рис. 4.13. Схема для расчета восстанавливающегося напряжения при неудаленном КЗ

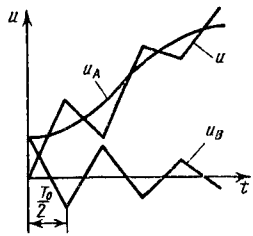


Рис. 4.14. Кривая восстанавливающегося напряжения

Особенно тяжелые условия восстановления напряжения наблюдаются при отключении КЗ воздушной линии вблизи мощной подстанции на расстоянии l от сборных шин в несколько сот метров — несколько километров. Восстанавливающееся напряжение на контактах A, B выключателя (рис. 4.13)

$$u_в = u_A - u_B.$$

Напряжение u_A относительно земли на контакте A меняется по кривой, аналогичной кривой на рис. 4.11, *в*. Напряжение u_B относительно земли контакта B меняется по пилообразной зависимости с высокой частотой колебаний (рис. 4.14), определяемой длиной l линии $f_0 = v/(4l)$, где v — скорость распространения волны по линии. Поскольку l невелика, то полупериод $T_0/2=1/(2f_0)$ мал и скорость восстановления напряжения значительна, достигая нескольких киловольт в микросекунду [4.1]:

$$du/dt = 0{,}22I,$$

где I — ток КЗ, А.

Если $U_A \ll U_B$, то первый пик восстанавливающегося напряжения

$$U_{вmax} = 2\sqrt{2}\, I\omega L_2' l.$$

Время наступления этого напряжения

$$T_0/2 = 4l/V,$$

здесь L_2' — удельная индуктивность линии, Гн/км; l — длина линии, км; $\omega = 314$ 1/с; T_0 — период пилообразного напряжения, с; V — скорость движения волны км/с; $V = 300\,000$ км/с для воздушной линии.

К неудаленным КЗ очень чувствительны воздушные выключатели (§ 18.5), у которых в первые моменты времени после прохода тока через нуль электрическая прочность восстанавливается медленно. Для облегчения гашения дуги применяются емкостные и активные шунты (см. § 4.6).

4.6. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ШУНТОВ

Возрастание скорости восстановления напряжения приводит к тяжелым режимам работы отключающих аппаратов. Облегчить эти режимы можно либо увеличением скорости нарастания электрической прочности в ДУ, либо искусственным снижением скорости восстановления напряжения. Второй путь более экономичен и в настоящее время широко используется. Для снижения скорости восстановления напряжения применяются низкоомные и высокоомные шунты.

Рассмотрим принцип действия низкоомного шунта (рис. 4.15). Выключающий аппарат имеет два разрыва. Разрыв *1* шунтирован резистором $R_ш$. Сопротивление $R_ш$ выбирается так, чтобы колебательный процесс восстановления напряжения перевести в апериодический. Для этого необходимо соблюдать неравенство $R_ш < \frac{1}{2}\sqrt{L/C_{эк}}$. Обычно сопротивление $R_ш$ так мало, что влиянием $C_{эк}$ можно пренебречь. Тогда

$$u = E\left(1 - e^{-tR_ш/L}\right). \qquad (4.16)$$

Процесс восстановления напряжения при наличии шунта и без него показан на рис. 4.16. Наибольшая скорость, В/мкс, имеет место при $t = 0$:

$$\left.\frac{du}{dt}\right|_{t=0} = \frac{ER_ш}{L}\,10^{-6}. \qquad (4.17)$$

Шунтирующий резистор с малым сопротивлением позволяет настолько снизить скорость восстановления напряжения, что гашение дуги в первом разрыве практически не

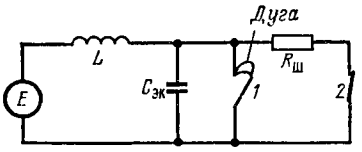


Рис. 4.15. Применение низкоомного шунта

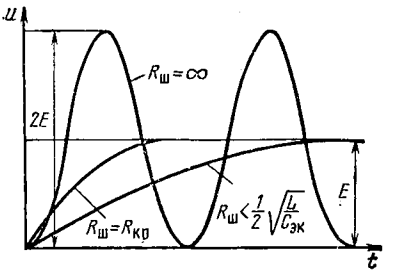


Рис. 4.16. Процесс восстановления напряжения при наличии и отсутствии шунта

будет зависеть от собственной частоты сети. Возможный максимальный пик восстанавливающегося напряжения при этом уменьшается примерно в 2 раза. Для снижения скорости восстановления напряжения на первом разрыве желательно иметь возможно малое значение $R_ш$.

Как правило, дуга в разрыве *1* гаснет при первом прохождении тока через нуль. После этого расходятся контакты разрыва *2* (см. рис. 4.15) и между ними загорается дуга. Резистор $R_ш$ облегчает работу и этого разрыва, так как его введение в цепь уменьшает ток и сдвиг фаз между током и напряжением источника, что снижает восстанавливающееся напряжение промышленной частоты.

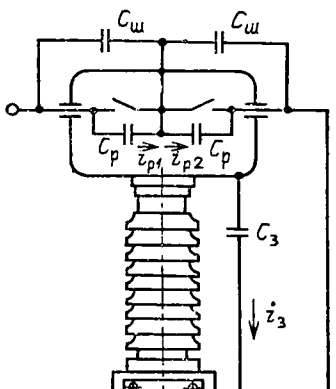


Рис. 4.17. Выравнивание напряжения по разрывам выключателя с помощью шунтирующих конденсаторов:

$i_{р1}$, $i_{р2}$, $i_з$ — токи через первый, второй разрывы и через емкость на землю соответственно; $C_р$, $C_з$ и $C_ш$ — емкости между разрывами, на землю и шунтирующие разрывы

Для облегчения режима работы второго разрыва $R_ш$ должно быть возможно бóльшим. Обычно $R_ш$ определяется условиями работы разрыва *1*. Подробнее выбор $R_ш$ приведен в [4.1].

Шунтирующие резисторы с малым сопротивлением применяются в выключателях на

все классы напряжения, особенно при напряжениях до 35 кВ, где токи отключения достигают больших значений. При напряжении более 35 кВ применяются многократные разрывы. Восстанавливающееся напряжение промышленной частоты, приходящееся на один разрыв, уменьшается пропорционально числу разрывов. Соответственно уменьшается и скорость восстановления напряжения. Емкостное сопротивление между всеми контактами практически одинаково, но токи, текущие через разрывы, различны ввиду наличия емкостей элементов аппарата относительно земли $C_з$ (рис. 4.17). Это создает неравномерность напряжения по разрывам. С ростом числа разрывов эта неравномерность увеличивается. Для выравнивания напряжения по разрывам применяют емкостные шунты $C_ш$ [18.5]. При $C_ш \geqslant \geqslant 20\,C_з$ токами $i_з$, текущими через паразитные емкости на землю, можно пренебречь. При этом напряжение делится поровну между разрывами.

4.7. ОТКЛЮЧЕНИЕ КОРОТКОЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

К моменту прохождения тока через нуль промежуток между электродами заполнен сильно ионизированным газом. Под действием восстанавливающегося напряжения образуется электрическое поле, которое действует на ионы и электроны. Из-за малой массы скорость электронов в электрическом поле примерно в 2000 раз больше скорости положительных ионов.

Электроны, обладающие большой скоростью, быстро уходят из зоны катода, и около катода появляется положительный объемный заряд. Благодаря высокой проводимости остальной части промежутка, в которой положительные и отрицательные ионы взаимно уравновешиваются, почти все напряжение, подведенное к электродам, прикладывается к области положительного объемного заряда у катода. В этой области возникает очень высокая напряженность поля $E_п$, достигающая 30 000 кВ/м.

Примерная картина распределения зарядов в объеме, напряженности электрического поля $E_п$ и напряжения на промежутке u представлена на рис. 4.18, где d — толщина слоя положительного объемного заряда, расположенного у катода; $U_п$ — напряжение, приложенное к электродам.

Для того чтобы дуга загорелась вновь, необходимо, чтобы из катода было получено соответствующее количество основных носителей тока в дуге — электронов. Если катод

не нагрет до температуры, при которой начинается термоэмиссия, то необходимое количество электронов может быть получено только за счет автоэлектронной эмиссии. Последняя возможна при напряженности поля примерно 20 000 кВ/м (при медных электродах). Расчеты показывают, что такая напряженность поля получается при напряжении на промежутке 250 В [4.1]. Если напряжение меньше, то дуга гаснет.

При сильно нагретых электродах часть электронов с катода получается за счет термоэмиссии и напряжение, необходимое для начала разряда, снижается до 160—170 В. Прочность промежутка после прохождения тока через нуль сильно зависит от материала электродов и при латунных электродах достигает 320 В.

Исследования показали [4.2], что электрическая прочность, возникающая около катода, в значительной степени зависит от нагрева опорной точки дуги. При холодных электродах эта прочность приближается к указанному выше значению (250 В) и имеет место при небольших токах и быстром перемещении дуги по электродам.

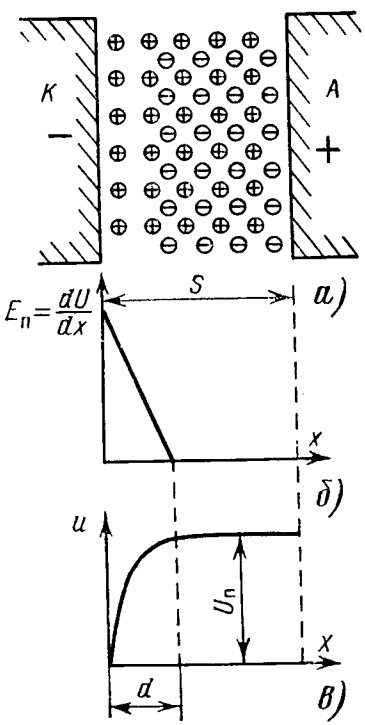


Рис. 4.18. К анализу процессов в короткой дуге переменного тока:

а — распределение зарядов в дуговом промежутке; *б* и *в* — зависимости электрической напряженности и разности потенциалов от положения точки в дуговом разряде

При токах примерно сотни ампер даже при быстром перемещении дуги по электродам из-за термоэлектронной эмиссии прочность падает до 140 В при медных электродах. При токах более 100 А и неподвижных опорных точках дуги прочность снижается до 40—60 В. При токах КЗ она снижается до околоэлектродного падения напряжения (20—30 В).

Явление образования околокатодной прочности открыто Слепяном и в настоящее время широко используется для гашения дуги в дугогасящих решетках (§ 4.11) аппаратов низкого напряжения. Дуга разбивается на ряд коротких дуг с помощью металлических электродов. После прохождения тока через нуль ре-

зультирующая электрическая прочность равна сумме всех околокатодных прочностей. Если результирующая прочность больше пика восстанавливающегося, напряжения, то дуга гаснет при первом же прохождении тока через нуль.

4.8. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЦЕПЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ТОКА

В связи с широким применением высокочастотной закалки и высокочастотных печей электрические аппараты используются для отключения цепей с частотой тока до 10 000 Гц при напряжении до 1500 В и токах до 600—1000 А. Рассмотрим восстанавливающееся напряжение, которое имеет место при отключении таких установок.

При выводе (4.13) было принято, что ЭДС источника в процессе восстановления напряжения постоянна. При частотах порядка 10 000 Гц такое допущение неправомерно, так как собственная частота рассматриваемых цепей соизмерима с частотой источника. В этом случае напряжение, восстанавливающееся на контактах выключателя, выражается формулой

$$u_в = E\cos\omega t - Ee^{-pt}\cos\omega_0 t = e_1 - e_2, \qquad (4.18)$$

где E — амплитуда ЭДС источника; ω — угловая частота тока источника питания; ω_0 — собственная частота колебаний отключаемой цепи; p — коэффициент затухания собственных колебаний, $p = R/(2L)$.

Для анализа кривой восстанавливающегося напряжения примем $\omega = \omega_0$. Тогда (4.18) принимает вид

$$u_в = E\cos\omega t\left(1 - e^{-pt}\right). \qquad (4.19)$$

В кривой восстанавливающегося напряжения различаются составляющие установившегося режима $e_1 = E\cos\omega t$ и переходного режима $e_2 = -Ee^{-pt}\cos\omega t$. Эти составляющие и результирующая кривая представлены на рис. 4.19, *а*. Амплитуда восстанавливающегося напряжения возрастает постепенно по мере затухания переходной составляющей e_2. Максимальная амплитуда восстанавливающегося напряжения равна амплитуде ЭДС источника.

При отключении чисто активной цепи после погасания дуги на промежутке восстанавливается ЭДС источника e_1 и переходная составляющая не возникает (рис. 4.19, *б*). Амплитуда напряжения на промежутке появляется через четверть периода источника питания. Если сравнить кри-

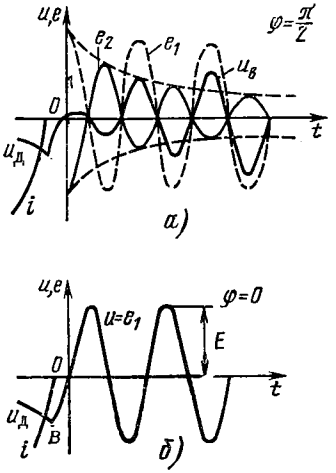


Рис. 4.19. Процесс восстановления напряжения при повышенной частоте тока

вые рис. 4.19, *а* и *б*, то видно, что в случае отключения чисто активной цепи условия восстановления напряжения более тяжелые, чем при отключении чисто индуктивной цепи.

Следует отметить, что при частоте 50 Гц к каждому переходу тока через нуль температура дуги спадает на 30—50 % максимального значения. Это облегчает условия отключения. При повышенной частоте из-за тепловой инерции дугового разряда такого снижения температуры не наблюдается, что затрудняет гашение дуги. Если частота тока приближается к 10 кГц, то условия гашения дуги переменного тока примерно такие же, как и при постоянном токе [3.2]. Наиболее эффективным средством гашения дуги при повышенной частоте является применение дугогасящей решетки (§ 4.11).

4.9. ОТКЛЮЧЕНИЕ МАЛЫХ ИНДУКТИВНЫХ ТОКОВ

При отключении малых индуктивных токов из-за эффективной деионизации возможен обрыв (срез) тока до естественного прохождения его через нуль. Срез тока при отключении индуктивной цепи может привести к перенапряжению, опасному для изоляции аппарата и отключаемого оборудования. На практике срезы тока встречаются при отключении первичных обмоток трансформаторов на холостом ходу или при небольшой индуктивной нагрузке.

Упрощенная схема замещения представлена на рис. 4.20, *а*. При срезе тока электромагнитная энергия, накопленная в индуктивности трансформатора, переходит в электростатическую:

$$L_т\, i_{ср}^2/2 = C_т\, U_{ср}^2/2, \qquad (4.20)$$

где $L_т$ — индуктивность трансформатора; $i_{ср}$ — ток среза; $C_т$ — эквивалентная емкость трансформатора; $U_{ср}$ — напря-

жение на трансформаторе при срезе (параллельно с источником показана емкость источника питания $C_г$).

Согласно (4.20) напряжение на трансформаторе при срезе тока:

$$U_{ср} = i_{ср}\sqrt{L_т/C_т}.$$

Так как $C_т$ невелика, то $U_{ср}$ может достигать весьма больших значений, которые могут привести к пробою изоляции трансформатора. Исследования показали, что при отключении малых индуктивных токов перенапряжения могут

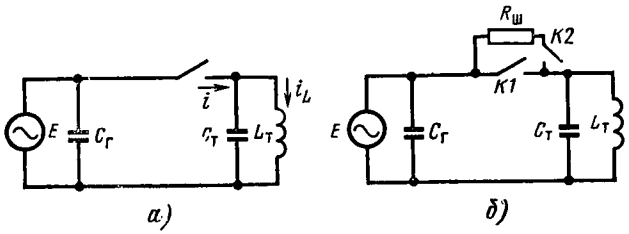


Рис. 4.20. К процессу среза тока

достигать $4U_{ном}$ в сетях 110 кВ и $8U_{ном}$ в сетях 6 кВ [4.3]. Для ограничения перенапряжений контакты коммутирующего аппарата шунтируются резистором, который переводит колебательный процесс изменения напряжения на трансформаторе в апериодический (рис. 4.20, *б*). В этом случае коммутирующий аппарат имеет два разрыва, один из которых шунтирован резистором $R_ш$. Вначале расходятся контакты *K1*, и резистор $R_ш$ через генератор подключается параллельно трансформатору. Электромагнитная энергия переходит в тепловые потери на этом резисторе. Сопротивление резистора должно быть

$$R_ш \leqslant \frac{1}{2}\sqrt{L_т/C_т}.$$

С точки зрения уменьшения перенапряжений значение $R_ш$ должно быть возможно меньше. Минимальное значение $R_ш$ ограничивается отключающей способностью второго разрыва *K2*.

4.10. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ И ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

а) Перенапряжения при отключении конденсатора. Рассмотрим процесс отключения конденсатора C в схеме рис. 4.21, *а*. Зависимости токов и напряжений во времени даны на рис. 4.21, *в*. Поскольку нагрузка чисто емкостная, ток i_C в цепи опережает напряжение источника на 90°.

Пусть контакты разошлись в точке *1* и дуга погасла в точке *2*. В этот момент напряжение на конденсаторе достигает амплитудного значения напряжения источника. Напряжение на шинах (слева от выключателя) также равно напряжению источника, так что разность потенциалов на контактах выключателя u практически равна нулю. Если пренебречь сопротивлением утечки конденсатора, то после гашения дуги можно считать, что напряжение на конденсаторе постоянно и равно U_C.

Напряжение на шинах $u_ш$ меняется по закону $E\cos\omega t$, и далее разность потенциалов на контактах выключателя будет изменяться по закону

$$u = E - E\cos\omega t = E(1 - \cos\omega t).$$

По истечении полупериода напряжение на промежутке достигает значения $2E$. Если прочность междуконтактного промежутка превышает $2E$, то на этом процесс отключения заканчивается.

Напряжение, появляющееся на контактах в установках высокого напряжения, может пробить промежуток. Рассмотрим наиболее тяжелый случай, когда пробой промежутка происходит через 0,01 с после погасания дуги. В момент пробоя (точка *3*) напряжение на промежутке равно $2E$. При пробое возникает высокочастотный процесс изменения напряжения. Амплитуда переходной составляющей в начальный момент равна $2E$. Частота колебаний определяется индуктивностью источника L и отключаемой емкостью C. Напряжение высокочастотной составляющей колеблется около ЭДС источника как около нулевой линии. Из-за наличия потерь в емкости эта составляющая затухает.

Высокочастотный ток колебательного разряда, меняясь с той же частотой f_0, отстает от напряжения на 90°. Если дуга с высокочастотным током погаснет в первый нуль тока (точка *4*), то напряжение на конденсаторе будет равно

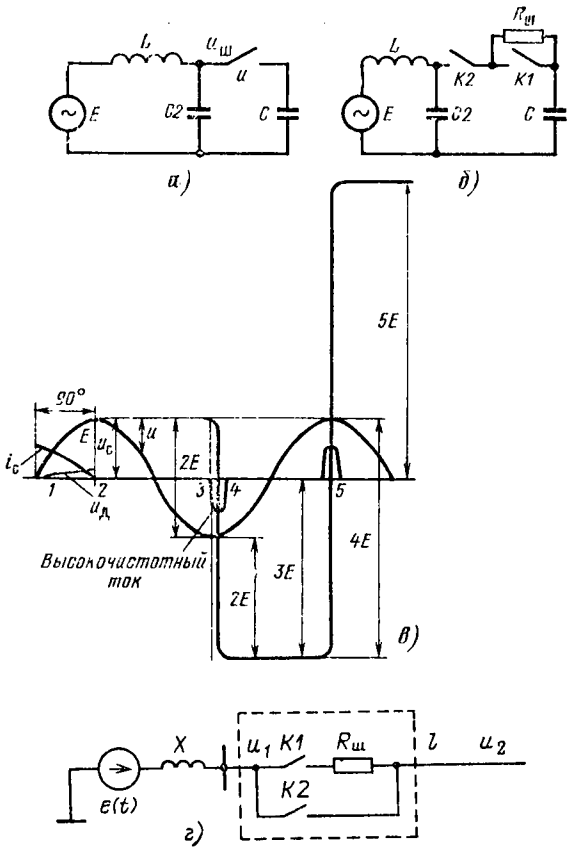


Рис. 4.21. Отключение емкостного тока:

а — схема замещения; *б* — отключение емкостного тока при наличии шунта $R_ш$; *в* — процесс отключения емкостного тока при наличии повторных пробоев; *г* — длинная линия с предвключаемым резистором $R_ш$

$3E$, а напряжение на зажимах выключателя $2E$. Через полупериод основной частоты к промежутку будет приложено напряжение $4E$. Если промежуток не выдержит этого напряжения, возникает повторный пробой с амплитудой переменной составляющей высокой частоты $4E$. В том случае, когда дуга с током высокой частоты будет погашена в первый нуль тока (точка *5*), напряжение на конденсаторе станет равным $5E$. Если не учитывать затухания, то при

каждом повторном пробое напряжение на конденсаторе возрастает на $2E$. При первом пробое оно равно $3E$, при втором $5E$ и т. д. Таким образом, повторные пробои дают чрезвычайно опасные перенапряжения, которые могут повести к повреждению изоляции оборудования.

Повторные пробои должны быть устранены либо за счет быстрого роста прочности промежутка, либо снижением напряжения на емкости после гашения дуги в точке *2* за счет разряда этой емкости на шунтирующий резистор $R_ш$ (рис. 4.21, *б*). В этом случае сначала размыкается контакт *К1* и вводится сопротивление $R_ш$, после чего отключается ток контактом *К2*. Расчеты напряжения на контактах выключателей и выбор $R_ш$ приведены в [4.1 и 18.5]. Величина $R_ш$ выбирается так, чтобы, с одной стороны, снизить напряжение на контактном промежутке и избежать повторных пробоев, с другой — обеспечить надежное отключение оставшегося тока контактом *К2*.

При отключении длинной не нагруженной на конце линии процесс проходит аналогичным образом, если не появляется повторный пробой. При повторных пробоях в линии возникают волновые процессы, которые в конечном счете создают примерно такие же высокие потенциалы в установке, как и при отключении конденсатора.

б) **Перенапряжения при включении длинных линий.** При включении длинных не нагруженных на конце линий электропередачи и при их АПВ (§ 18.1) возможны перенапряжения, опасные для установленного оборудования. Для борьбы с этими перенапряжениями используются два способа. При первом способе специальной схемой управления контакты выключателя замыкаются тогда, когда разность потенциалов на них равна нулю. При этом исключается причина возникновения переходного процесса, создающего перенапряжения. Выключатель должен иметь стабильное время включения, поддерживаемое с высокой точностью, и довольно сложную схему управления. Поэтому пока этот способ распространения не получил. При втором способе применяется схема с предвключаемым резистором (рис. 4.21, *г*). Здесь $e(t)$ — ЭДС источника, x — его индуктивное сопротивление, u_1 — напряжение на левом выводе выключателя, u_2 — напряжение в начале линии длиной l. При включении линии вначале включаются вспомогательные контакты *К1* и в цепь вводится резистор $R_ш$. Введение этого резистора усиливает процесс затухания и снижает перена-

пряжения. Спустя 1,5—2 периода сети переходной процесс заканчивается, включаются главные контакты *К2* и процесс включения завершается.

4.11. СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

а) **Воздействие на столб электрической дуги.** Задача ДУ состоит в том, чтобы обеспечить гашение дуги за малое время с допустимым уровнем перенапряжений, при малом износе частей аппарата, при минимальном объеме раскаленных газов, с минимальным звуковым и световым эффектами.

Рассмотрим ДУ аппаратов низкого напряжения. Для гашения дуги постоянного тока необходимо, чтобы ВАХ дуги $u_д$ шла выше прямой $U—iR$. Так как $u_д=E_п l+u_э$, то подъем характеристики можно получить за счет увеличения длины дуги l, напряженности электрического поля в столбе дуги (градиента) $E_п$ и использования околоэлектродного падения напряжения $u_э$. Увеличить градиент $E_п$ можно путем эффективного охлаждения дуги и подъема давления среды, в которой она горит. Охлаждение дуги можно создать за счет перемещения дуги в воздухе или газе, за счет их перемещения относительно дуги либо размещения дуги в узкой щели, стенки которой имеют высокую теплопроводность и дугостойкость.

Поднятие ВАХ за счет увеличения длины малоэффективно, так как значение $E_п$ для свободно горящей в воздухе дуги мало (10 В/см) и ее гашение требует значительного растяжения, что увеличивает габариты аппарата.

В электрических аппаратах низкого напряжения наиболее широко применяются ДУ с узкой щелью (§ 4.1). Для увеличения эффективности охлаждения ширина щели δ делается меньше диаметра дуги $d_д$. Кроме того, по мере втягивания дуги в щель она приобретает форму зигзага. При этом увеличивается не только длина дуги, но и отвод тепла от нее.

Перемещение дуги в такой камере осуществляется с помощью магнитного поля.

Важнейшей характеристикой дугогасительной камеры является зависимость градиента $E_п$ от ширины щели δ и тока I (рис. 4.22) [3.2]. Для каждого значения δ меняются ток I и напряженность магнитного поля H. Значение $\delta=\infty$ относится к открытой свободно горящей в воздухе дуге.

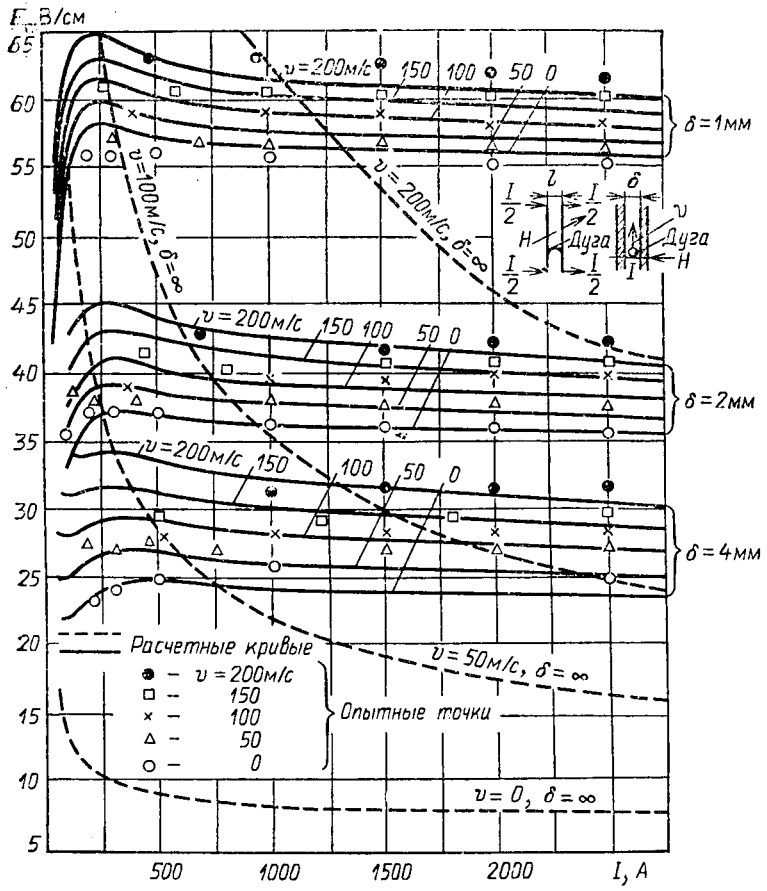


Рис. 4.22. Зависимость градиента $E_п$ дуги от тока и ширины щели; штриховые кривые — для открытой дуги; сплошные кривые — $E_п = f(I)$ для щели шириной 1—4 мм и при скоростях движения дуги υ=0—200 м/с

Для открытой дуги (штриховой линией) градиент $E_п$ резко изменяется в зависимости от тока и для неподвижной дуги составляет всего 10 В/см. Для узкой щели $\delta = 1 \div 4$ мм градиент $E_п$ мало зависит от тока и увеличивается с уменьшением δ. Скорость движения дуги υ может достигать 200 м/с и при неизменном токе дуги I меняется за счет изменения напряженности поля H. Зависимость продольного градиента $E_п$ от ширины щели показана на рис. 4.23. Сле-

дует отметить, что при уменьшении ширины щели δ возрастает сопротивление движению дуги. Магнитная система ДУ должна исключать возможность остановки дуги, так как это приводит к разрушению керамики и отказу ДУ.

Наиболее характерные формы щели в керамических пластинах ДУ изображены на рис. 4.24, где *1* и *2* — зона наибольшего охлаждения дуги; *3* — продольная щель, в которую направляется дуга; *4* — расширение, облегчающее вхождение дуги в камеру; *5* — местные уширения в щели.

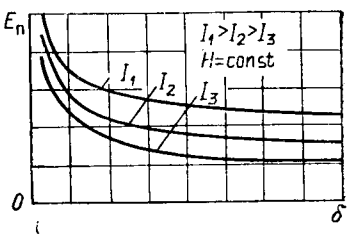


Рис. 4.23. Зависимость продольного градиента от ширины щели δ

Когда дуга под воздействием магнитного поля затягивается в зигзагообразную узкую щель, увеличивается ее длина. При этом возрастает градиент $E_п$ за счет охлаждения благодаря тесному контакту дуги с керамическими стенками щели. Наиболее эффективна форма рис. 4.24, *д*, при которой градиент $E_п$ дополнительно возрастает за счет местных уширений *5*.

Раскаленные газы, выбрасываемые из ДУ после гашения дуги, попадая на токоведущие детали оборудования, могут приводить к возникновению в нем КЗ. Поэтому на пути этих газов устанавливают решетку из металлических

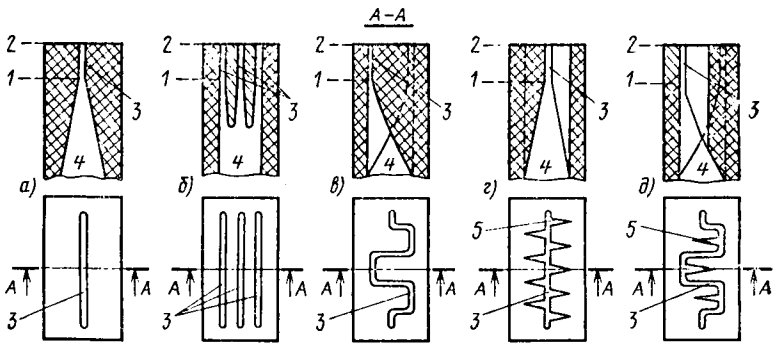


Рис. 4.24. Характерные формы продольных щелей дугогасительных камер

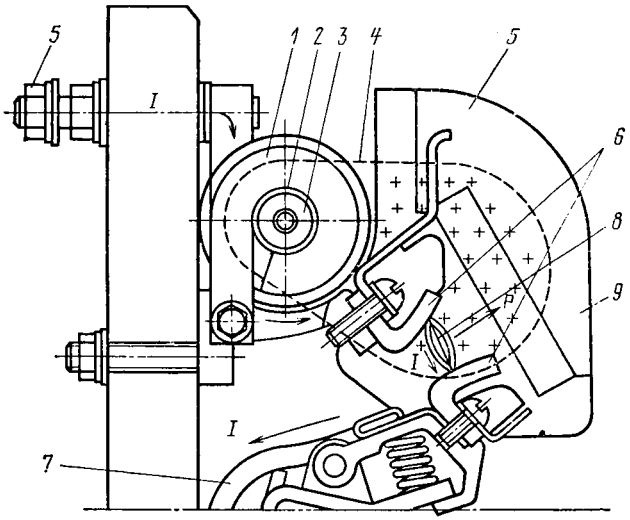


Рис. 4.25. ДУ с последовательной дугогасительной катушкой

пластин. Газы, проходя через эту решетку, деионизируются, охлаждаются, и опасная зона их выброса резко сокращается.

б) **Перемещение дуги под воздействием магнитного поля.** Электрическая дуга является своеобразным проводником с током, который может взаимодействовать с магнитным полем. Сила взаимодействия между током дуги и магнитным полем перемещает дугу, создается так называемое магнитное дутье. ДУ с магнитным дутьем показано на рис. 4.25. Магнитное поле создается катушкой *1*, включенной последовательно с коммутируемой цепью. Внутри катушки *1* размещен сердечник *3*, соединенный с ферромагнитными полюсами в виде пластин *4*. Между катушкой и сердечником размещается изоляционный цилиндр *2*. При протекании тока по катушке создается магнитное поле, направление которого указано крестиками. Ток протекает от входного контакта *5* по катушке *1*, замкнутым контактам *6* и гибкой связи *7* ко второму выходному контакту аппарата. При размыкании контактов *6* между ними возникает сначала жидкий металлический мостик, а затем дуга *8*. Под действием магнитного поля катушки возникает сила

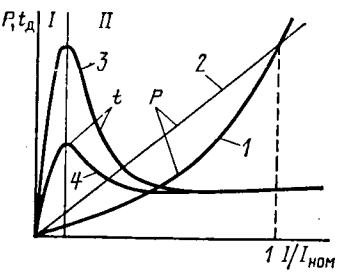


Рис. 4.26. Характеристики последовательного и параллельного магнитного дутья

P, которая перемещает дугу в керамическую камеру *9*. Сила, действующая на единицу длины дуги,

$$P = IB,$$

где B — индукция магнитного поля катушки в месте расположения дуги. Можно считать, что индукция $B \equiv I$ и, следовательно, $P = kI^2$. Эта сила перемещает дугу сначала в воздухе, а потом в узкой щели дугогасительной камеры и расходуется на преодоление аэродинамического сопротивления воздуха и силы трения дуги о стенки щели.

Магнитное поле может быть создано и параллельной катушкой, включенной на напряжение источника. В этом случае индукция не зависит от тока в дуге и сила пропорциональна этому току

$$P = BI \equiv I.$$

На рис. 4.26 показаны зависимости силы P, действующей на дугу, и длительности горения дуги $t_д$ от отключаемого тока в относительных единицах $I/I_{ном}$. Сила, действующая на дугу при последовательной катушке, пропорциональна квадрату тока и изображается кривой *1*. Зависимость при параллельной катушке описывается прямой *2*. Положим, что при $I/I_{ном} = 1$ эти силы равны.

В кривой $t_д(I/I_{ном})$ имеются две характерные области. В области *I* время $t_д$ растет с увеличением тока, в области *II* — падает. В области *I* сила P мала и гашение дуги происходит за счет ее удлинения расходящимся подвижным контактом.

Чем больше ток, тем больше требуется длина дуги для ее гашения и тем больше время гашения. В области *II*, как только контакты разомкнутся, с помощью ЭДУ дуга заводится в камеру и быстро гаснет. Наибольшая длительность горения дуги имеет место при $I = 5$А.

Из рис. 4.26 видно, что при малых токах сила, действующая на дугу при последовательной катушке, меньше, чем при параллельной. Поэтому длительность горения дуги при последовательной катушке (кривая *3*) больше, чем при параллельной (кривая *4*). За счет увеличения МДС катушки максимум кривой *4* может быть снижен.

Достоинства ДУ с последовательной катушкой:

1. При токах свыше 100 А магнитное поле быстро сдвигает дугу с рабочих поверхностей контактов, чем обеспечивается их малый износ. Система хорошо работает в области больших токов.

2. При изменении направления тока меняет знак и магнитное поле. Сила, действующая на дугу, не изменяет своего направления. Система работает при любом направлении тока.

3. Поскольку через катушку проходит номинальный ток контактора, она выполняется из провода большого сечения. Падение напряжения на катушке составляет доли вольта.

Наряду с достоинствами такие ДУ имеют и недостатки. Это недостаточно надежное гашение дуги при малых токах (5—7 А), большая затрата меди на катушку, нагрев контактов за счет тепла в дугогасительной катушке.

Несмотря на эти недостатки, благодаря высокой надежности при гашении номинальных и больших токов ДУ с последовательной катушкой получили преимущественное распространение.

ДУ с параллельной катушкой обладают следующими недостатками:

1. Направление электродинамической силы, действующей на дугу, зависит от полярности тока. При изменении направления тока меняется направление движения дуги и контактор становится неработоспособным.

2. При КЗ возможно снижение напряжения на источнике, питающем катушку. В результате процесс гашения дуги идет неэффективно.

В связи с указанными недостатками ДУ с параллельной катушкой напряжения применяются только при отключении небольших токов (5—10 А).

Воздействовать на дугу можно и магнитным полем постоянного магнита. При этом отсутствуют затраты энергии на создание магнитного поля; резко сокращается расход меди на контактор; отсутствует подогрев контактов от катушки, как это имеет место в ДУ системы с последовательной катушкой. По сравнению с ДУ с параллельной катуш-

кой ДУ с постоянным магнитом обладает высокой надежностью и может использоваться при любых значениях тока. За счет конструктивных мер ДУ с постоянным магнитом можно сделать работоспособным при любом направлении тока. Характеристики такого ДУ аналогичны характеристикам ДУ с параллельной катушкой.

Дугогасительные устройства с магнитным дутьем и керамической дугогасительной камерой применяются также и в аппаратах переменного тока.

В ДУ с последовательной катушкой сила, действующая на дугу, пропорциональна квадрату тока. Поэтому и при переменном токе на дугу действует сила, неизменная по направлению. Среднее значение силы получается таким же, как и при постоянном токе, при условии, что постоянный ток равен действующему значению переменного тока. Указанные соотношения справедливы, когда потери в магнитной системе катушки дутья отсутствуют и поток по фазе совпадает с током. Несмотря на эффективность устройства, оно применяется только в контакторах с тяжелым режимом работы при числе включений в час более 600.

Недостатком этих устройств является наличие потерь в стали магнитной системы дугогашения, что ведет к повышению температуры контактов, и возможность возникновения больших перенапряжений при принудительном обрыве тока (до естественного нуля).

Параллельные катушки в ДУ переменного тока не применяются из-за того, что сила, действующая на дугу, меняет свой знак, так как поток, создаваемый магнитной системой дугогашения, сдвинут по фазе относительно отключаемого тока.

ДУ переменного тока с последовательной катушкой и керамической дугогасительной камерой применяются в высоковольтных выключателях напряжением не выше 10 кВ.

в) **Гашение дуги с помощью дугогасительной решетки.** В дугогасительной решетке для гашения дуги используется околоэлектродное падение напряжения $u_э$ (в аппаратах постоянного тока) и околокатодная электрическая прочность (в аппаратах переменного тока).

После расхождения контактов *1* и *2* (рис. 4.27, *б*) возникшая между ними дуга *3* под воздействием магнитного поля движется вверх на пластины *5* и разбивается на ряд коротких дуг *4*. На каждой пластине образуются катод и анод. Падение напряжения на каждой паре пластин составляет 20—25 В. При большом числе пластин удается

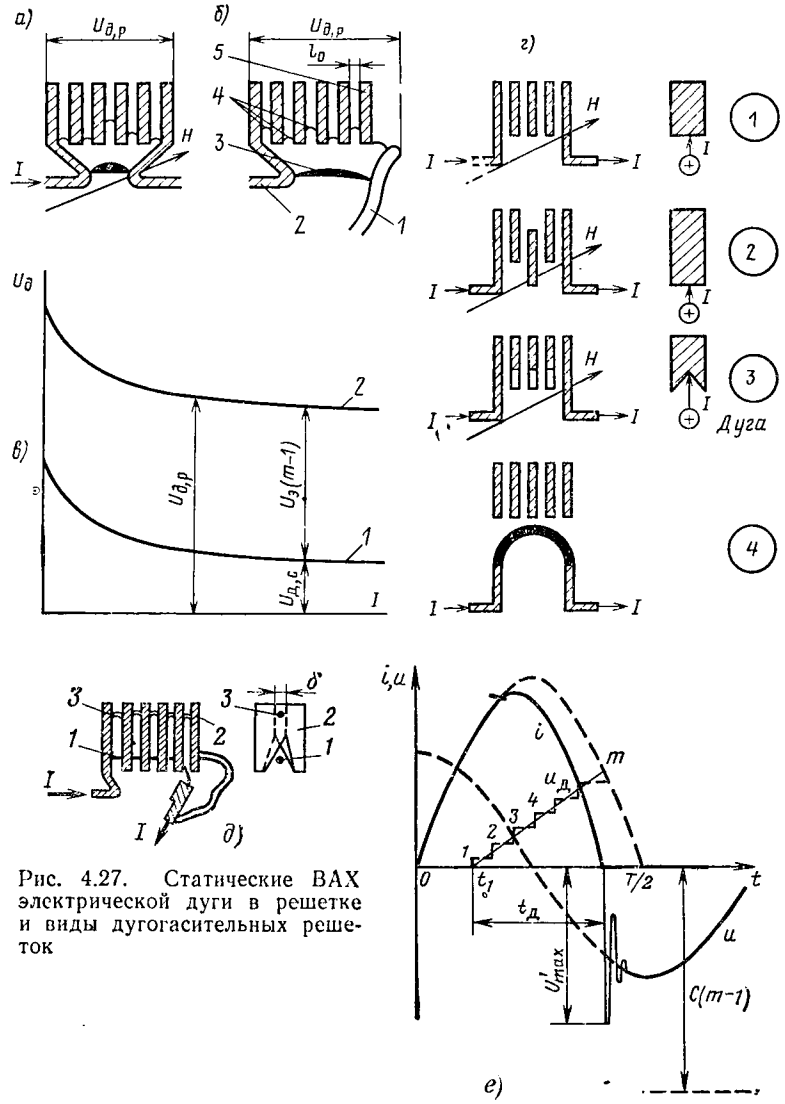


Рис. 4.27. Статические ВАХ электрической дуги в решетке и виды дугогасительных решеток

поднять статическую ВАХ дуги и обеспечить условия ее гашения. Способ предложен еще в начале века русским ученым М. О. Доливо-Добровольским и до сих пор широко применяется.

Для аппаратов постоянного тока напряжение дугогасительной решетки

$$U_{д.р} = U_э (m - 1) + E_п l_д,$$

где $U_э$ — сумма околоэлектродных падений напряжения, $U_э = u_к + u_а$, В; m — число пластин; $E_п$ — градиент напряжения на свободно горящей дуге, В/см; $l_д$ — длина дуги, см, $l_д = (m-1) l_0$ (l_0 — зазор между пластинами).

Обозначим напряжение на столбе дуги $U_{д.с} = E_п l_д$. Форма статической ВАХ дуги (рис. 4.27, *в*) близка к форме характеристики дуги в воздухе $U_{д.с} = f(l)$, но смещена вверх на величину $u_э(m-1)$. На рис. 4.27, *в* кривая *1* — напряжение на дуговых промежутках, кривая *2* — результирующее напряжение $U_{д.р}$. Для гашения дуги необходимо соблюсти условие (4.7)

$$U_{д.р} = U_э (m - 1) + E_п l_0 (m - 1) > U - iR,$$

где R — сопротивление нагрузки; U — напряжение источника.

На рис. 4.27 показаны различные схемы ДУ с дугогасительными решетками. В решетке на рис. 4.27, *а* дуга выводится на пластины и делится между ними с помощью магнитного поля напряженностью H, создаваемого специальной системой. В решетке на 4.27, *б* дуга втягивается в решетку за счет электродинамических усилий, возникающих в контуре *1*, *3*, *2*, и за счет усилий, действующих на дугу, благодаря наличию ферромагнитных пластин *5* (§ 1.7). В конструкции рис. 4.27, *г* (позиция *3*), для облегчения вхождения дуги в решетку пластины имеют клиновидный паз. Для того чтобы дуга не образовала жидких мостиков между пластинами, расстояние между ними берется не менее 2 мм.

На постоянном и переменном токе частотой 50 Гц применяются ферромагнитные пластины. В соответствии с § 1.7 сила, действующая на дугу, перемещает ее в решетку и препятствует выходу дуги из нее. Как следует из (1.31), эта сила пропорциональна току и производной потока по перемещению. Выход дуги из решетки увеличивает магнитное сопротивление, уменьшает поток, что вызывает появление силы, стремящейся втянуть дугу в решетку. Это является большим достоинством ферромагнитных пластин. Недостатком дугогасительной решетки является прогорание пластин в повторно-кратковременном режиме при токе 600 А и более. Для уменьшения коррозии пластины покрываются медью или цинком.

Процесс гашения дуги в дугогасительной решетке при переменном токе имеет свои особенности. После расхождения контактов (рис. 4.27, *д*) дуга *1* за счет электромагнитных сил затягивается на решетку *2* и делится на ряд коротких дуг. Введение в цепь $(m-1)$ коротких дуг уменьшает ток в цепи из-за падения напряжения на них, равного $U_э(m-1)$. В результате ток проходит через нуль раньше своего естественного нуля $(t=T/2)$ (рис. 4.27, *е*). При этом облегчаются условия процесса восстановления напряжения (уменьшается $\sin\varphi_к$ цепи). Длительность горения дуги $t_д$ уменьшается. После прохождения тока через нуль около каждого катода в соответствии с § 4.7 восстанавливается электрическая прочность, достигая 300 В при малых токах и 70 В при больших. Гашение происходит при выполнении условия $c(m-1) > U'_{max}$, где c — околокатодная прочность. Благодаря высокой восстанавливающейся прочности число пластин в аппаратах переменного тока в 7—8 раз меньше, чем у аппаратов постоянного тока.

Несмотря на быстрое гашение дуги, при частых коммутациях номинального тока пластины нагреваются до очень высокой температуры и возможно даже их прогорание. В связи с этим число включений и отключений в час у контакторов с дугогасящей решеткой не превышает 600. При большей частоте коммутаций приходится использовать электромагнитное дутье и керамическую камеру. При использовании дугогасящей решетки на постоянном токе или частоте 50 Гц электромагнитные силы, действующие на дугу, втягивают ее в ферромагнитную решетку. В высокочастотных аппаратах на токи частотой 5—10 кГц в ферромагнитных пластинах наводятся вихревые токи, которые отталкивают дугу от решетки. Такая сила отталкивания возникает и при использовании латунных пластин. Поэтому для перемещения дуги в решетку необходимы специальные электромагнитные системы. Поскольку восстанавливающаяся прочность у латунных пластин выше, чем у ферромагнитных, они нашли применение в высокочастотных аппаратах. Следует отметить, что применение электромагнитного дутья и керамической камеры на повышенных частотах малоэффективно — дуга горит многие сотни полупериодов.

г) **Гашение дуги высоким давлением.** В § 4.1 было показано, что степень ионизации x уменьшается обратно пропорционально квадратному корню из давления. С ростом давления возрастает плотность газа, при этом увеличиваются теплопроводность и отвод тепла от дуги. Если при данном

токе в дуге увеличить давление окружающей среды, то увеличится отвод тепла. Для того чтобы сохранить тот же ток, необходимо к дуге подвести большую мощность, что при неизменном токе требует повышения напряжения на дуге (градиента $E_п$).

На этом принципе основано гашение дуги в предохранителях и других аппаратах низкого напряжения. Внутренний объем предохранителя герметизирован. При перегорании плавкой вставки дуга загорается и выделяет энергию, которая расходуется на повышение давления во внутреннем объеме предохранителя. Из кинетической теории газов известна связь между давлением p, объемом V и энергией $W_г$ газа:

$$pV = \frac{2}{3} W_г = \frac{2}{3} W_д \simeq \frac{2}{3} \frac{1}{2} LI_0^2 = \frac{1}{3} LI_0^2.$$

Энергия, полученная газом, $W_г$ равна энергии, выделенной дугой, $W_д$, которая может быть приравнена к электромагнитной энергии отключаемого контура $LI_0^2/2$. Таким образом, давление p во внутреннем объеме предохранителя зависит от отключаемого тока I_0 и индуктивности коммутируемой цепи L.

По опытным данным, градиент $E_п$ в процессе гашения дуги быстро растет с ростом давления:

$$E_п = E_0 p^k \cdot 10^k; \quad k = 0{,}5 \div 1,$$

где E_0 — градиент напряжения в дуге при атмосферном давлении (давление p в мегапаскалях).

В некоторых аппаратах (предохранителях, пакетных выключателях и др.) стенки дугогасящей камеры делаются из газогенерирующих материалов — фибры. Благодаря высокой температуре дуги такие стенки выделяют газ, и давление в объеме поднимается до 10—15 МПа за доли полупериода. Из-за резкого подъема напряжения на дуге ток обрывается до своего естественного нуля, не достигнув максимального значения. В таких аппаратах проявляется эффект токоограничения.

д) **Гашение электрической дуги в потоке сжатого газа.** В электрических аппаратах высокого напряжения коммутируются токи в десятки килоампер при напряжении до 10^6 В. Для решения такой сложной задачи используется воздействие на электрическую дугу потока сжатого воздуха или других газов. Сжатый воздух обладает высокой плотностью и теплопроводностью. Омывая дугу с большой скоростью,

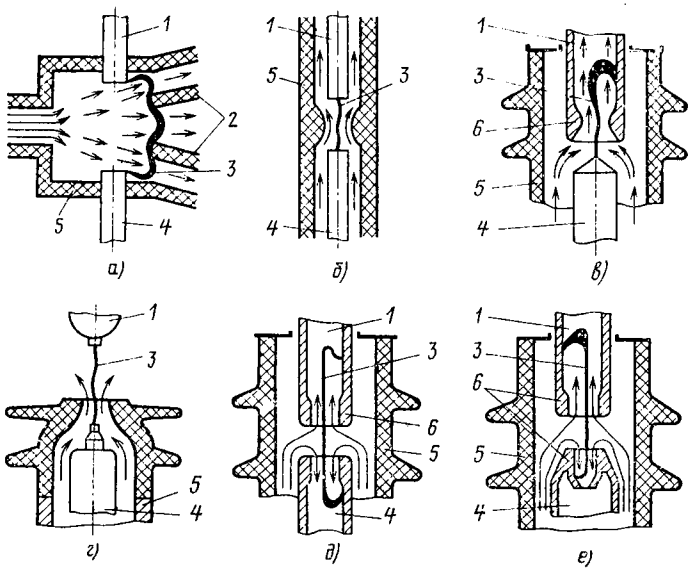


Рис. 4.28. Камеры ДУ с воздушным дутьем

он охлаждает ее и при прохождении тока через нуль обеспечивает деионизацию дугового столба. Воздух при высоком давлении обладает также высокой электрической прочностью, что создает высокую скорость нарастания электрической прочности промежутка.

Камеры с воздушным дутьем показаны на рис. 4.28. Сжатый воздух из компрессоров очищается от механических примесей с помощью фильтров и проходит специальную сушку от влаги. Давление, применяемое в воздушных выключателях, колеблется от 1 до 4 МПа. Возможны варианты ДУ с поперечным и продольным дутьем. В первом (рис. 4.28, *а*) воздушный поток направлен перпендикулярно дуге, во втором — вдоль ее оси. Дуга *3*, возникающая между контактами *1* и *4*, подвергается воздействию сжатого воздуха и прижимается к перегородкам *2*. При этом обеспечивается эффективное охлаждение дуги. Из-за больших габаритов и наличия органической изоляции в области дуги в настоящее время эти камеры не выпускаются (но в эксплуатации еще имеются). В настоящее время для аппаратов на все классы напряжения наиболее распространены ДУ продольного дутья (рис. 4.28, *б*—*е*). Наиболее со-

вершенными являются камеры по рис. 4.28, *д* и *е*. Корпус камеры *5* выполнен из фарфора. Дуга *3*, образующаяся между торцами контактов *1* и *4*, потоком воздуха быстро вдувается в их внутреннюю полость. При этом обеспечивается малый износ контактов. Пары металла электродов не попадают в междуконтактный промежуток и потоком воздуха выносятся в атмосферу. Благодаря этому пары металла электродов не уменьшают скорости восстановления электрической прочности промежутка. Элемент *6*, в котором электрическая дуга подвергается продольному охлаждению воздухом, называется соплом. После расхождения контактов в дуге выделяется мощность

$$P_д = u_д I.$$

Под действием этой мощности происходит быстрый подогрев воздуха и местное поднятие давления, в результате количество воздуха, охлаждающего дугу, и его скорость резко уменьшаются. При определенных условиях возможна вообще остановка воздушного потока. Происходит закупорка сопла ДУ. Это явление необходимо учитывать при проектировании ДУ, обеспечивая при амплитудном значении отключаемого тока минимальную скорость истечения воздуха не ниже 8—10 м/с.

После прохождения тока через нуль междуконтактный промежуток заполнен плазмой, нагретой до 12 000—15 000 К. При охлаждени плазмы дуги воздухом электрическая прочность промежутка восстанавливается с конечной скоростью. Чем больше отключаемый ток, тем труднее охладить плазму и тем медленнее идет процесс восстановления электрической прочности. Поэтому для ДУ с продольным дутьем характерно уменьшение отключаемого тока с ростом скорости восстановления напряжения. При больших значениях отключаемого тока необходимо снижать скорость восстановления напряжения сети с помощью шунтирующих резисторов (§ 4.6).

Одним из способов дальнейшего увеличения номинальных напряжений установок и допустимых токов КЗ является применение новых дугогасящих газов. Наилучшие результаты получены с электротехническим газом — элегазом (SF_6), примененным впервые в Советском Союзе. По сравнению с воздухом элегаз обладает следующими преимуществами:

1. Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза выше, чем

у воздуха, и при давлении 0,2 МПа близка к электрической прочности трансформаторного масла.

2. В ДУ продольного дутья дугогасящая способность элегаза примерно в 5 раз выше, чем у воздуха.

3. Высокая удельная плотность улучшает теплоотдачу токоведущих систем, что позволяет увеличить допустимую плотность тока и уменьшить массу меди в выключателе.

4. Малое значение градиента $E_{\text{п}}$ в электрической дуге уменьшает эффект закупорки сопла. Это позволяет увеличить междуконтактный зазор и повысить напряжение на каждом разрыве. При этом сокращается число разрывов на выключатель.

5. Элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом и водородом, слабо разлагается дугой. Элегаз нетоксичен, хотя некоторые продукты, образующиеся при воздействии дуги, опасны.

Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. Так, например, при давлении 1,31 МПа переход из газообразного состояния в жидкое происходит при 0 °С. Это заставляет при высоком давлении прибегать к подогревающим устройствам. В элегазовом ДУ высокого давления гашение дуги происходит так же, как и в воздушном ДУ. Из-за сложности и пониженной надежности такие ДУ не используются.

Широкое применение в выключателях нашли автопневматические элегазовые ДУ. В выключателе поддерживается давление 0,35 МПа, при котором температура сжижения элегаза составляет —40 °С. При отключении выключателя его механизм воздействует на поршневое устройство, создающее в зоне горения дуги давление 0,7—0,8 МПа. При этом обеспечивается надежное гашение дуги. В настоящее время воздушные ДУ вытесняются элегазовыми.

в) **Гашение дуги в трансформаторном масле.** Простейшее ДУ такого типа представлено на рис. 4.29, *а*. Дугогасительная камера *6* выполнена из прочного изоляционного материала (гетинакса или стеклотекстолита) и расположена в трансформаторном масле *1*. При отключении подвижный контакт *7* перемещается вниз с большой скоростью. Между ним и неподвижным контактом *2* загорается дуга *4*. Под действием энергии дуги происходит взрывоподобное разложение масла на водород и газы в виде паров масла. Водород обладает исключительно высокой теплопроводностью и является одной из лучших дугогасящих сред. Температура газа достигает 2000—3000 К. За сотые доли се-

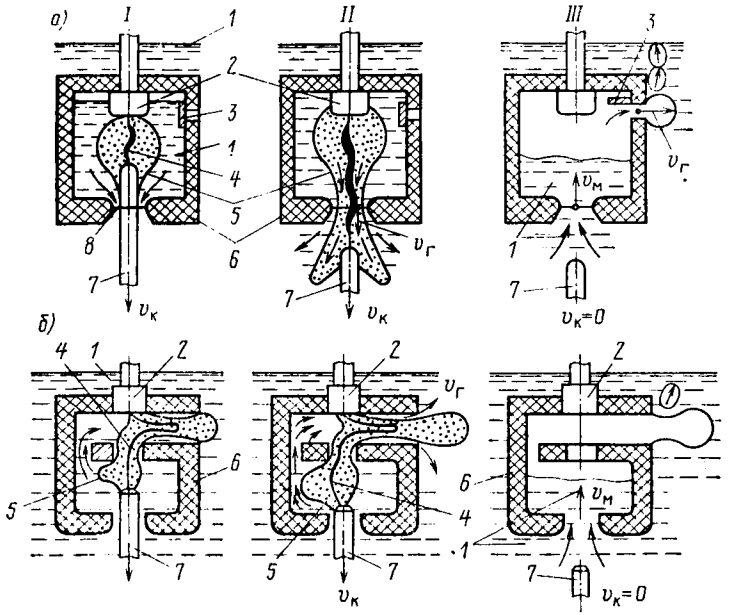


Рис. 4.29. ДУ масляных выключателей

купды давление поднимается до 2—4 МПа. Образующийся газовый пузырь *5* стремится вырваться из камеры через щель *8*. При этом происходит эффективное охлаждение дуги потоками газа, вытекающими из камеры со скоростью звука. Поскольку давление и эффективность гашения дуги зависят от ее энергии, то чем больше отключаемый ток, тем быстрее происходит гашение. Зависимость длительности отключения от тока аналогична приведенной на рис. 4.26. При малом токе из-за недостатка энергии дуги процесс гашения затягивается, и для его ускорения необходимы специальные меры. На рис. 4.29, *б* показано, что дуга *4* в нижней части объема камеры создает дополнительный объем газа, который гонит масло со скоростью *V* на дугу, затянутую в щель. В результате этого процесс дугогашения ускоряется. В выключателях на напряжение 220—500 кВ приходится включать большое число камер последовательно, так как каждая камера работает при напряжении не более 100 кВ. Простейшая камера (рис. 4.29, *а*) работает при напряжении не выше 10 кВ.

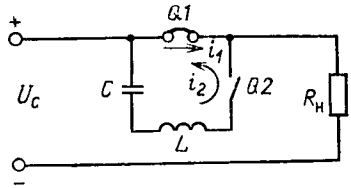
Освобождение газов из камеры после гашения дуги производится через отверстие *3*.

ж) **Гашение дуги в вакуумной среде.** В вакуумном ДУ контакты расходятся в среде с давлением 10^{-4} Па (10^{-6} мм рт. ст.), при котором плотность воздуха мала. Длина свободного пробега молекулы достигает 50, а длина свободного пролета электрона 300 м. При таких условиях электрический пробой между электродами затруднен из-за отсутствия носителей зарядов. Пробивное напряжение промежутка длиной 1 мм в вакууме достигает 100 кВ.

Процесс горения и гашения дуги в вакууме при переменном токе происходит следующим образом. При размыкании контактов контактное нажатие непрерывно уменьшается, а переходное сопротивление контактов увеличивается и при нажатии, равном нулю, стремится к бесконечности. Даже при небольших токах в момент размыкания контактов из-за выделения большого количества тепла материал контактов плавится и образуется жидкий металлический мостик, который под действием высокой температуры нагревается и испаряется. При разрыве мостика загорается дуга, которая горит в среде паров металлов электродов. Вакуумная дуга при токах менее 10 кА характеризуется малым падением напряжения, составляющим 20—30 В. После прохождения тока через нуль вакуумная дуга гаснет. Скорость диффузии зарядов очень высока из-за большой разницы плотностей частиц в дуге и окружающем ее вакууме. Практически через 10 мкс после нуля тока между контактами восстанавливается электрическая прочность вакуума. Быстрая диффузия частиц, высокие электрическая прочность вакуума и скорость ее восстановления обеспечивают гашение дуги при первом прохождении тока через нуль. Большим достоинством этого ДУ является высокая скорость восстановления электрической прочности промежутка. Вакуумные ДУ являются в настоящее время наиболее эффективными и долговечными. Их срок службы без ревизии достигает 25 лет. Созданы ДУ на ток отключения до 100 кА при напряжении 10 кВ и на отключаемый ток 40 кА при напряжении 160 кВ.

Вакуумные ДУ могут применяться и для отключения постоянного тока. Для этого используются схемы, аналогичные показанной на рис. 4.30. На отключаемый вакуумным выключателем *Q1* постоянный ток i_1 накладывается переменный ток i_2 контура *LC*, который начинает протекать после замыкания выключателя *Q2*. В результате суммиро-

Рис. 4.30. Схема для отключения цепи постоянного тока



вания токов i_1 и i_2 в один из моментов времени результирующий ток проходит через нуль и дуга гаснет. После этого выключатель *Q2* отключается. Конденсатор *C* заряжается от специального источника. Вследствие сложности схемы вакуумные выключатели постоянного тока применяются пока редко.

з) **Гашение электрической дуги с помощью полупроводниковых приборов.** Бесконтактная коммутация. При большом числе коммутаций в час возрастает износ контактов при обычной дуговой коммутации. Для повышения износостойкости контактов используются полупроводниковые приборы — тиристоры, транзисторы и диоды.

Тиристор является управляемым полупроводниковым вентилем. На рис. 4.31, *а* показано условное обозначение тиристора: *А* — анод; *К* — катод; *У* — управляющий электрод. На управляющий электрод подается положительный

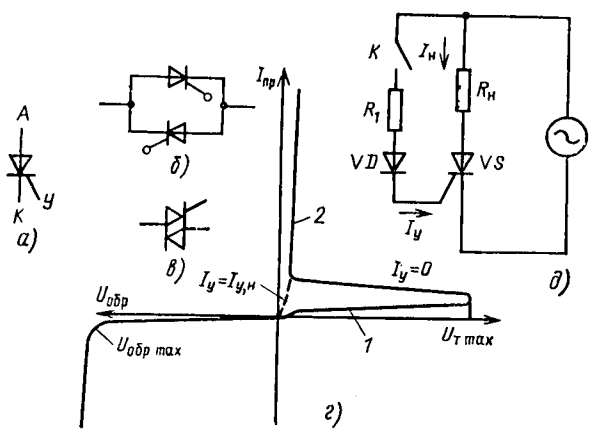


Рис. 4.31. Применение тиристоров в электрических аппаратах:

а — условное графическое обозначение; *б* — встречно-параллельное включение тиристоров в цепи переменного тока; *в* — симистор; *г* — ВАХ — вольт-амперная характеристика тиристора; *д* — релейный элемент на тиристоре

потенциал относительно катода. На рис. 4.31, *б* показаны два тиристора, включенных в цепь переменного тока. На рис. 4.31, *в* показан симистор, представляющий собой сдвоенный тиристор. Симистор обладает свойствами двух тиристоров по схеме рис. 4.31, *б*. Ток управления подается на управляющий электрод. При отсутствии сигнала управления ($I_у=0$) и $U_{max}<U_{тmax}$ тиристор имеет большое конечное сопротивление и через нагрузку $R_н$ протекает небольшой ток (ветвь *1* на рис. 4.31, *г*). Если $U_{max}>U_{тmax}$, то тиристор открывается и через нагрузку течет ток $I_н$, определяемый ее сопротивлением. При номинальном токе управления $I_у=I_{у,н}$ переход на ветвь *2* происходит по штриховой кривой. Таким образом, при отсутствии тока управления $I_у=0$ тиристор ведет себя как очень большое активное сопротивление, при наличии номинального тока управления — как очень малое сопротивление. После прохождения переменного тока через нуль тиристор восстанавливает свои вентильные свойства, цепь тока обрывается.

На рис. 4.31, *д* показана схема релейного элемента на тиристоре. При отключенном *К* тиристор *VS* закрыт и ток в нагрузке $R_н$ равен 0. При включении *К* положительный ток управления $I_у$ подается на управляющий электрод тиристора и он открывается. Через нагрузку протекает ток $I_н$. В следующий полупериод тиристор закрывается и ток $I_н=0$. Диод *VD* защищает тиристор от отрицательного тока управления. В настоящее время применяются так называемые гибридные схемы коммутаторов на тиристорах (рис. 4.32). Главные контакты *ГК*, рассчитанные на пропускание номинального тока и тока КЗ, шунтированы встречно включенными тиристорами *VS1* и *VS2*. В цепь *ГК* включен трансформатор тока *ТА*, вторичные обмотки которого через диоды *VD1* и *VD2* подключены к управляющим электродам тиристоров. На эти электроды должен подаваться только положительный сигнал относительно катода. В каждом плече схемы включены стабилитроны *VD3—VD6* для ограничения сигнала. Конденсатор *С3* и резистор *R4* облегчают условия восстановления напряжения на тиристорах. Во включенном положении аппарата *ГК* замкнуты и на вторичных обмотках трансформатора тока присутствует сигнал управления. Пусть в данный положительный полупериод тока положительный сигнал управления подается на тиристор *VS1* и он подготавливается к открытию. В этот момент тиристор *VS2* закрыт, так как к нему приложено напряжение обратной полярности. Благодаря диоду *VD2*

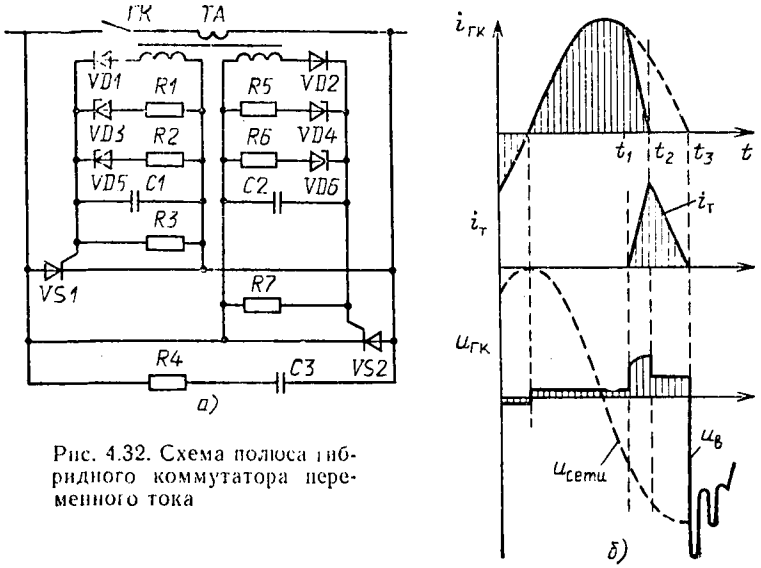


Рис. 4.32. Схема полюса гибридного коммутатора переменного тока

сигнал управления на этот тиристор не подается. Для протекания тока через тиристор напряжение между катодом и анодом должно быть не менее 1—2 В. Переходное сопротивление *ГК* мало, и падение напряжения на них и первичной обмотке трансформатора составляет доли вольта. Поэтому, несмотря на то что на тиристор *VS1* подан открывающий сигнал, он остается закрытым. При размыкании *ГК* напряжение на дуге достаточно для открытия тиристора *VS1* и ток переходит в его цепь. Поскольку ток в первичной обмотке трансформатора прекратился, сигнал, открывающий тиристор, стал равным нулю. Однако ток через тиристор продолжает протекать до своего естественного нулевого значения. При прохождении тока через нуль тиристор закрывается и отключение цепи заканчивается. Если контакты расходятся в отрицательный полупериод, то подобным образом работает тиристор *VS2*. Процесс перехода тока в цепь тиристора показан на рис. 4.32, *б*. Здесь ток тиристора обозначен $i_т$, ток $ГК — i_{гк}$, напряжение на *ГК* $u_{гк}$, напряжение, восстанавливающееся на тиристоре, $u_в$. В момент t_1 начинается переход тока в цепь тиристора. В момент t_2 процесс перехода тока закончен и ток цепи полностью переходит в тиристор. Длительность перехода тока

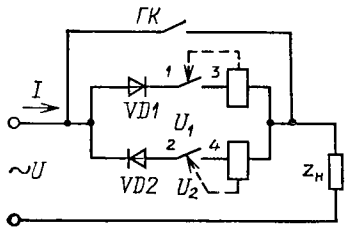


Рис. 4.33. Силовая цепь коммутационного устройства с диодами для гашения дуги

t_2—t_1 определяется параметрами тиристора и его цепей управления, а также активным сопротивлением и индуктивностью цепи *ГК*. Длительность горения дуги *ГК* составляет малую долю полупериода, что резко ограничивает их износ. Электрическая износостойкость *ГК* приближается к механической. При прохождении тока через нуль в момент времени t_3 тиристор закрывается. Длительность протекания тока через тиристор не превышает полупериода. В таком режиме тиристор выдерживает ток, значительно больший номинального. Это позволяет использовать тиристоры на небольшие номинальные токи (по сравнению с током КЗ цепи), что уменьшает габаритные размеры и стоимость аппарата.

Описанная схема используется и в аппаратах высокого напряжения. Поскольку номинальное напряжение тиристоров не превышает 1,5 кВ, то в этих случаях используется цепочка последовательно включенных тиристоров [4.5]. Достоинствами рассмотренной схемы являются простота, высокая надежность и облегченный режим работы тиристоров. К недостаткам можно отнести увеличение стоимости и габаритов, отсутствие гальванической развязки между сетью и нагрузкой после отключения. В схеме на рис. 4.33 главные контакты *ГК* шунтированы цепями дугогасительных контактов *1* и *2* [8.3]. В цепь контактов *1*, *2* включены диоды *VD1*, *VD2* и синхронизирующие электромагниты *3*, *4*, имеющие обмотки тока. После размыкания *ГК* ток цепи перебрасывается в цепь диода *VD1* или *VD2* в зависимости от полярности тока. При указанном на рисунке направлении ток *1* протекает через электромагнит *3* и его якорь удерживает контакты *1* замкнутыми. При подходе тока к нулю сила электромагнита уменьшается и контакты *1* размыкаются. Таким образом, дуга возникает вблизи нуля тока и горит кратковременно, что уменьшает ее энергию, облегчает гашение и снижает износ контактов. После про-

хождения тока через нуль диод находится в непроводящем состоянии, что облегчает процесс восстановления напряжения на промежутке, так как восстанавливающееся напряжение в основном приложено к диоду ($R_{обр} \gg R_{пр}$). Процесс отключения заканчивается. Контакторы с диодной коммутацией созданы на напряжение до 1140 В и ток до 250 А. Применяемые в таких устройствах кремниевые диоды более дешевы, чем тиристоры, и допускают 15—16-кратную токовую перегрузку в течение 0,01 с. Большим достоинством схемы является отсутствие гальванической связи нагрузки и сети после отключения.

и) **Бездуговая коммутация электрических цепей.** На рис. 8.14 показан аппарат для управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Блок силовых тиристоров *Б1* включен между сетью и двигателем. Управление тиристорами *VS1*, *VS2*, *VS3* производится блоком управления *Б2*, в котором вырабатываются запускающие импульсы на силовые тиристоры. Если прекращается работа *Б2*, то запускающие импульсы исчезают, и при прохождении тока через нуль силовые вентили закрываются, обесточивая двигатель. Блоком *Б3* обеспечивается защита двигателя от потери фазы, блок *Б4* отключает двигатель при токовой перегрузке. Подробно работа этой схемы бездуговой коммутации рассмотрена в § 8.5. На основе тиристоров могут быть созданы полупроводниковые выключатели, с помощью которых отключение цепи происходит до прохождения тока через нуль. Для этого применяются схемы принудительной коммутации.

На рис. 4.34, *а* показана схема принудительной коммутации цепи постоянного тока. Параллельно силовому тиристору $VS_с$ включена шунтирующая цепь $L_к C_к$, управляемая коммутирующим тиристором $VS_к$. Конденсатор $C_к$ заряжен с указанной полярностью. При открытии тиристора $VS_к$ начинается колебательный процесс разряда конденсатора $C_к$ через индуктивность $L_к$, тиристор $VS_к$ и тиристор $VS_с$. Ток $i_с$ направлен встречно току $i_н$, и в момент их равенства тиристор $VS_с$ закрывается (время t_2 на рис. 4.34, *б*). Ток колебательного разряда теперь проходит через диод *VD*. Падение напряжения на диоде *VD* является запирающим для тиристора $VS_с$. В течение времени $t_{п,в} = t_3 - t_2$ тиристор должен восстановить свои запирающие свойства. Это время должно быть равно или больше времени восстановления прочности тиристора $t_т \leqslant t_{п,в}$. Такая же схема при принудительной коммутации переменного

тока позволяет создать токоограничивающий выключатель с защитой самого тиристора от сверхтоков.

На рис. 4.34, *в* приведена упрощенная схема тиристорного коммутатора постоянного тока. При нажатии кнопки *Вкл.* открывается тиристор *VS1* и через нагрузку $R_н$ течет ток I_0. Конденсатор *C* через резистор $R_д$ заряжается до напряжения U_0. После включения кнопка *Вкл.* отпускается и с *VS1* снимается управляющий сигнал.

Для отключения нажимается кнопка *Откл.* При этом открывается тиристор *VS2* и конденсатор *C* разряжается по контуру *VS2*, *R*, *VS1*. Ток через тиристор *VS1* равен разности токов I_0 и I_c разряда конденсатора. В момент прохода результирующего тока через нуль тиристор *VS1* закрывается и цепь отключается.

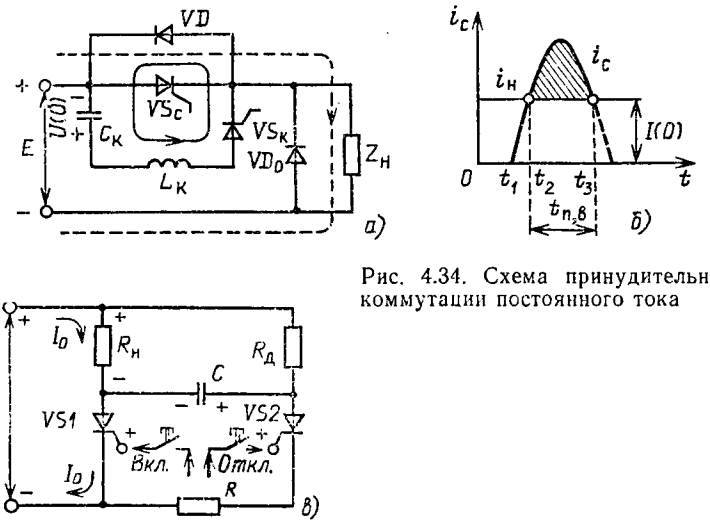


Рис. 4.34. Схема принудительной коммутации постоянного тока

Описанные схемы бездуговой коммутации с тиристорами пока не так широко применяются из-за сложности, высокой стоимости и больших габаритов. Чаще применяются схемы бездуговой коммутации цепей постоянного и переменного тока на основе транзисторов.

Транзистор является полупроводниковым прибором, который позволяет плавно менять ток в нагрузке при изменении тока или напряжения на управляющем электроде. На рис. 4.35 даны схема включения и основные харак-

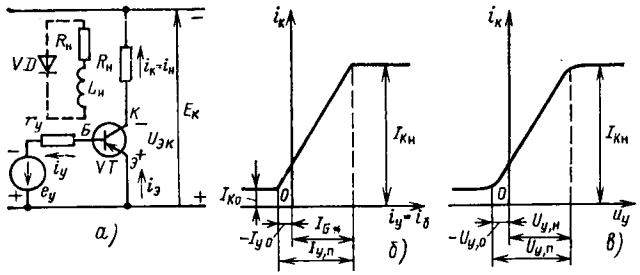


Рис. 4.35. Каскад усилителя на транзисторе

теристики биполярного транзистора типа *p-n-p*. Прибор имеет управляющий электрод — базу *Б*, эмиттер *Э* и коллектор *К*. Нагрузка $R_н$, $L_н$ включается в цепь коллектора. При отсутствии тока управления $I_у = I_б = 0$ через коллектор протекает небольшой ток. Для полного закрытия необходимо подать ток $-I_{у0}$. Ток $I_{Ко}$ называется током отсечки. При подаче положительного тока управления $I_у$ ток в нагрузке линейно возрастает и при $I_у = I_{Бн}$ достигает наибольшего значения $I_{Кн}$. При этом ток определяется сопротивлением нагрузки $I_{Кн} \simeq E_К/R_н$. На рис. 4.35, *в* представлена зависимость тока $I_К$ от напряжения на базе. На базу подается отрицательный потенциал относительно эмиттера. Для перевода транзистора из закрытого состояния в открытое на базу необходимо подать напряжение переключения $U_{у,п}$.

Транзистор может работать в ключевом режиме. При $I_у = 0$ транзистор практически закрыт, при $I_у = I_{у,п}$ транзистор открыт. Этот режим используется в транзисторах, работающих в коммутационных аппаратах. Если нагрузка имеет активно-индуктивный характер ($R_н$, $L_н$), то при резком снижении тока при закрытии транзистора появляется довольно высокое напряжение $-Ldi/dt$, которое может пробить транзистор. Для его защиты устанавливается диод *VD*, который шунтирует нагрузку $R_н$, $L_н$ при появлении напряжения $-Ldi/dt$. Транзисторы типа *p-n-p* выполняются с использованием германия. В настоящее время преимущественно применяются транзисторы типа *n-p-n* на базе кремния, которые более устойчивы к внешним воздействиям. Для транзисторов типа *n-p-n* характерно увеличение коллекторного тока при увеличении положительного потенциала базы относительно эмиттера. К коллектору при-

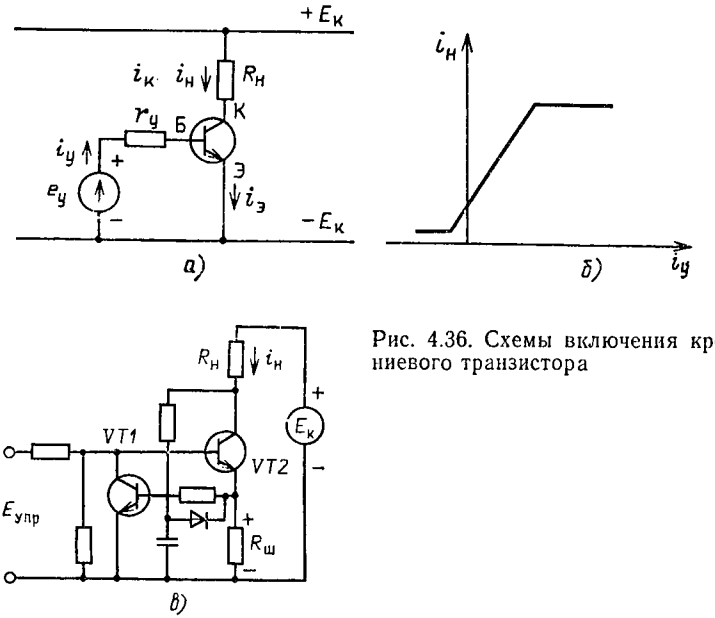


Рис. 4.36. Схемы включения кремниевого транзистора

ложен плюс источника питания, к эмиттеру минус. Схема включения *n-p-n* транзистора приведена на рис. 4.36, *а*. На рис. 4.36, *б* показана зависимость тока коллектора $I_к$ (тока нагрузки) от тока базы для транзистора типа *n-p-n*.

Транзисторы имеют большие преимущества перед тиристорами благодаря простоте схемы управления. На рис. 4.36, *в* показан транзисторный коммутатор с защитой от токов перегрузки и КЗ. При подаче напряжения $E_{упр}$ на базу кремниевого транзистора *VT2* он открывается и включает ток $i_н$ в нагрузке $R_н$. При протекании тока в шунте $R_ш$ создается падение напряжения, которое стремится открыть транзистор *VT1*. При определенном токе нагрузки транзистор *VT1* открывается, на базу транзистора *VT2* подается нулевой потенциал и он закрывается. В настоящее время созданы транзисторы, которые коммутируют токи до 600 А при напряжении до 300 В.

Описанные выше транзисторы называются биполярными. Биполярный транзистор — это полупроводниковый прибор, содержащий кристалл полупроводника с тремя слоями чередующейся проводимости и двумя *p-n* переходами. Биполярный транзистор управляется током, подава-

емым на его базу. В коммутационных бесконтактных аппаратах применяются также полевые транзисторы, отличающиеся высоким входным сопротивлением (малый ток управления 10^{-8} А), малым сопротивлением в открытом состоянии (0,03—0,3 Ом), малым током в закрытом состоянии (10^{-9} А), высокой скоростью переключения (около 10 нс по сравнению с микросекундами у биполярного транзистора).

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, управляемый электрическим полем (напряжением, подаваемым на затвор) и имеет очень большое входное сопротивление.

Допустимый коммутируемый ток полевых транзисторов до 30 А при напряжении до 500 В.

4.12. Пример расчета скорости восстановления напряжения

Трехфазная трансформаторная группа с номинальной мощностью 32 000 кВ·А и напряжением 35 кВ/110 кВ питается от системы бесконечной мощности. Трехфазное КЗ произошло на стороне $U_{ном}=110$ кВ и отключается выключателем. Нулевая точка трансформатора на стороне 110 кВ заземлена, а в месте КЗ нуль изолирован. Напряжение КЗ трансформатора $e_к=10{,}5$ %. Емкость одной фазы трансформатора $C_т=3500$ пФ. К шинам 110 кВ присоединено оборудование общей емкостью $C_{1-1}=4000$ пФ.

Требуется найти частоту восстанавливающегося напряжения и среднюю скорость восстановления напряжения на контактах полюса выключателя, отключающегося первым.

Схема замещения для расчета представлена на рис. 4.37, *а*. Каждая фаза трансформатора представляется индуктивностью L и эквивалентной емкостью $C_{э,т}=C_т/2$ на ее концах. Так как нуль заземлен, то в схеме остается одна емкость $C_{э,т}=C_ф=1750$ пФ.

Предположим, что создались условия гашения дуги в фазе A. Тогда фазы B и C замкнуты и на полюсе фазы A восстанавливается напряжение, равное сумме напряжений на емкостях $C_ф$ и $2C_ф$. Поскольку цепь чисто индуктивная, то угол $\varphi=90°$, и при прохождении тока фазы A через нуль мгновенное значение ЭДС в этой фазе равно амплитуде, а ЭДС фаз B и C составляет $-0{,}5$ амплитуды. Тогда мгновенное значение напряжения промышленной частоты на разрыве A

$$u_A=\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}\sqrt{2}-\left(-0{,}5\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}\sqrt{2}\right)=1{,}5\frac{U_{ном}\sqrt{2}}{\sqrt{3}}.$$

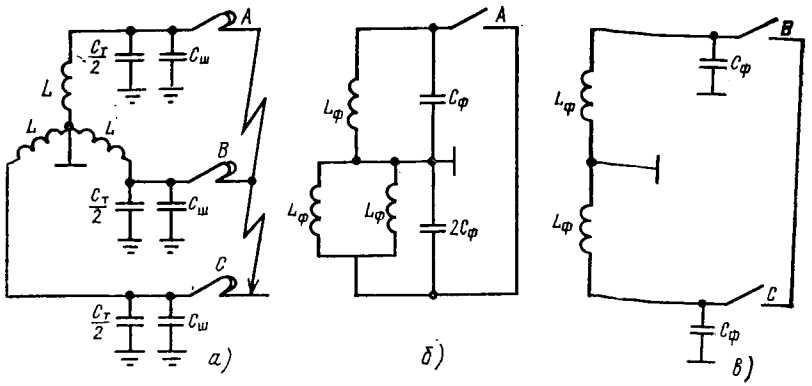


Рис. 4.37. Схемы замещения для расчета процесса восстановления напряжения

Частоты колебаний в верхнем и нижнем контурах одинаковы:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0{,}5L\ 2C}}.$$

Индуктивность

$$L = \frac{X_к}{\omega} = \frac{U_{ном}}{\omega\sqrt{3}\,I_к} = \frac{U_{ном}\,e_{к\%}}{\omega\sqrt{3}\,I_{ном}\cdot 100}$$

или, если выражать ток $I_{ном}$ через мощность $P_{ном}$ и напряжение $U_{ном}$,

$$L = \frac{U_{ном}\,x_{к\%}\,U_{ном}\sqrt{3}}{\omega\sqrt{3}\,P_{ном}\cdot 100} = \frac{U^2_{ном}\,x_{к\%}}{2\pi f P_{ном}\cdot 100} =$$

$$= \frac{110^2\cdot 10^6\cdot 10{,}5}{2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 32\,000\cdot 10^3\cdot 100} = 0{,}126\ \text{Гн}.$$

Согласно [4.1] при повышенной частоте индуктивность трасформатора уменьшается на 30 %. Тогда

$$L_ф = 0{,}7L = 0{,}0883\ \text{Гн}.$$

Общая емкость фазы $C_ф = C_{э,т} + C_ш = 1750 + 4000 = 5750$ пФ.

Частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_ф C_ф}} = \frac{1}{6{,}28\sqrt{0{,}0883\cdot 5750\cdot 10^{-12}}} = 7{,}07\cdot 10^3\ \text{Гц}.$$

Средняя скорость восстановления напряжения

$$\frac{du}{dt_{ср}} = 4f_0 \cdot 1{,}5\sqrt{2}\,\frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}\,10^{-6} = 4 \cdot 7{,}07 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5\sqrt{2}\,\frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\,10^{-6} =$$

$$= 3800 \text{ В/мкс}.$$

После отключения фазы A в следующий нуль тока гаснет дуга в фазах B и C (рис. 4.37, *в*). Примем, что напряжение между полюсами фаз B и C делится поровну. Тогда

$$\frac{du}{dt_{ср}} = 4f_0\,\frac{\sqrt{2}}{2}\,U_{ном} \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 7{,}07 \cdot 10^3 \times$$

$$\times\,\frac{\sqrt{2} \cdot 110 \cdot 10^3}{2}\,10^6 = 2200 \text{ В/мкс}.$$

Таким образом, отключение полюсов B и C происходит в более легких условиях.

Глава пятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНЫХ ЦЕПЯХ АППАРАТОВ

а) **Магнитная цепь.** Электромагниты широко применяются в таких электрических аппаратах, как контакторы, пускатели, реле, автоматы, электромагнитные муфты и т. д.

Основные соотношения для магнитной цепи электромагнита рассмотрим на примере клапанной системы (рис. 5.1). Подвижная часть магнитной цепи, создающая рабочее усилие, называется якорем *1*. Участки магнитопровода *3* и *4* называют стержнями или сердечниками.

В клапанной системе якорь может иметь как поступательное (рис. 5.1), так и вращательное движение (см. рис. 5.15).

При прохождении тока по намагничивающей катушке *2* создается МДС, под действием которой возбуждается магнитный поток Ф. Этот поток замыкается как через зазор δ, так и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы.

Воздушный зазор δ, меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим. Соответственно магнитный поток, проходящий через рабочий зазор, называется ра

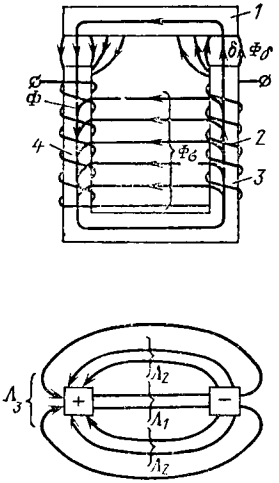


Рис. 5.1. Клапанная магнитная система электромагнита

бочим магнитным потоком и обозначается Φ_δ. Все остальные потоки в магнитной цепи, не проходящие через рабочий зазор, называются потоками рассеяния Φ_σ. Электромагнитное усилие, развиваемое якорем, определяется магнитным потоком в рабочем зазоре δ.

При расчете магнитной цепи определяется МДС катушки, необходимая для создания заданного рабочего потока (прямая задача), либо рабочий поток по известной МДС катушки (обратная задача). Эти задачи могут быть решены с помощью законов Кирхгофа для магнитной цепи. Согласно первому закону Кирхгофа *алгебраическая сумма потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю*:

$$\sum_{k=1}^{n} \Phi_k = 0. \tag{5.1}$$

Второй закон Кирхгофа следует из известного закона полного тока

$$\oint Hdl = \Sigma iw = F_j, \tag{5.2}$$

где H — напряженность магнитного поля; dl — элементарный участок контура интегрирования; $\Sigma iw = F_j$ — алгебраическая сумма МДС, действующих в контуре.

Так как $B = \mu_a H$, (5.2) можно записать

$$\oint \frac{B}{\mu_a} dl = \Sigma iw$$

или

$$\oint BS \frac{dl}{\mu_a S} = \Sigma iw, \tag{5.3}$$

где S — сечение данного участка магнитной цепи; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость участка dl, равная $\mu_0\mu_r$; здесь μ_0 — магнитная постоянная, μ_r — относительная магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость μ_a характеризует магнитную проводимость материала цепи.

Для воздуха магнитная проницаемость берется равной магнитной постоянной

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

Выражение $dl/(\mu_a S)$ аналогично выражению для активного сопротивления элемента электрической цепи $dl/(\sigma S)$ (где σ — удельная электрическая проводимость материала проводника). Тогда (5.3) можно представить в виде

$$\oint \Phi dR_m = \Sigma iw, \tag{5.4}$$

где dR_m — магнитное сопротивление участка длиной dl.

Падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме МДС, действующих в этом контуре. Это и есть второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.

В системе СИ единица абсолютной магнитной проницаемости — Гн/м, следовательно, единицей магнитного сопротивления является Гн^{-1}.

Когда поток в отдельных участках магнитной цепи не меняется, интеграл в (5.4) можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^{n} \Phi_j R_{mj} = \Sigma F_j. \tag{5.5}$$

Таким образом, *сумма падений магнитного напряжения по замкнутому контуру равна сумме МДС, действующих в этом контуре.*

Направление МДС, совпадающее с направлением обхода контура, принимается за положительное, противоположное ему — за отрицательное. За направление обхода обычно принимается направление магнитного потока. Из (5.5) вытекает закон Ома для магнитной цепи, при этом вместо тока подставляется магнитный поток, вместо электрического сопротивления — магнитное и вместо ЭДС подставляется МДС.

По аналогии с электрическим магнитное сопротивление участка конечной длины l можно представить как

$$R_m = \frac{1}{\mu_a} \frac{l}{S} = \rho_m \frac{l}{S},$$

где ρ_m — магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, также равном единице, м/Гн.

Для расчета по (5.5) необходимо знать ρ_m. Если задана не кривая $\rho_m(B)$, а кривая намагничивания материа-

ла $B(H)$, для расчета удобно использовать (5.2). Если на отдельных участках индукция постоянна, то интеграл в (5.2) можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^{n} H_j l_j = \Sigma F_j. \tag{5.6}$$

По известной индукции в каждом участке с помощью кривой $B(H)$ находят напряженность H_j, после чего с помощью (5.6) можно отыскать МДС катушки.

При расчете магнитной цепи часто более удобна величина, обратная магнитному сопротивлению, — магнитная проводимость, Гн,

$$\Lambda = 1/R_m = \mu_a S/l.$$

Уравнение (5.5) при этом принимает вид

$$\sum_{j=1}^{n} \Phi_j \frac{1}{\Lambda_j} = \Sigma F_j.$$

Для простейшей неразветвленной цепи с проводимостью Λ

$$\Phi \frac{1}{\Lambda} = Iw, \text{ или } \Phi = Iw\Lambda. \tag{5.7}$$

Магнитное сопротивление и проводимость ферромагнитных материалов являются сложной нелинейной функцией индукции. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_r = \mu_a/\mu_0$, а следовательно, и магнитной проводимости от индукции для магнитомягкого материала представлена на рис. 5.2. Максимальное значение $\mu_{r\,max}$ (минимальное магнитное сопротивление) имеет место при средних индукциях и определяется углом β_{max}. Начальное значение магнитной проницаемости $\mu_{r\,нач}$ определяется углом $\beta_{нач}$. В областях с индукцией от 0 до 0,1 и выше 1,7—1,8 Тл магнитное сопротивление стали резко возрастает из-за снижения μ_a.

Нелинейная зависимость магнитного сопротивления от индукции сильно затрудняет решение как прямой, так и обратной задачи.

б) **Магнитная проводимость воздушных зазоров.** В рабочем зазоре поток проходит через воздух, магнитная проницаемость которого не зависит от индукции и является постоянной, равной μ_0.

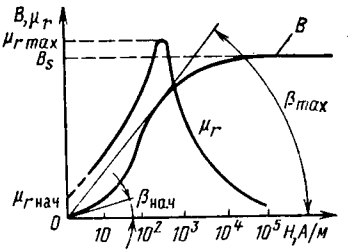


Рис. 5.2. Зависимость индукции B и относительной магнитной проницаемости μ_r от напряженности поля H

Для прямоугольных и круглых полюсов при малом зазоре δ поле приближенно можно считать равномерным и проводимость легко определить по формуле

$$\Lambda = \mu_0 \frac{S}{\delta}, \qquad (5.8)$$

где S — сечение потока в зазоре; δ — длина зазора.

Уравнением (5.8) можно пользоваться при соотношениях a/δ, b/δ, $d/\delta > 20$, где a и b — размеры прямоугольных полюсов; d — диаметр круглого полюса.

При больших рабочих зазорах у краев полюсов возникает дополнительный поток, называемый потоком выпучивания. В результате при данном значении разности магнитных потенциалов полный поток из полюса увеличивается. Магнитная проводимость, равная отношению потока к разности магнитных потенциалов, возрастает по сравнению с $\Lambda_\delta = \mu_0 S/\delta$, не учитывающей поток выпучивания.

Расчет проводимости с учетом выпучивания связан с большими трудностями ввиду сложности картины магнитного поля. Для расчета используются три основных метода:

1. Расчет по эмпирическим формулам. Так, например, по данным [5.1] для проводимости между торцами цилиндрических полюсов диаметром d достаточно точный результат дает формула

$$\Lambda = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0{,}48d + \frac{0{,}36d^2}{2{,}4d + \delta} \right).$$

Последние два слагаемых учитывают поток выпучивания. Аналогичные формулы рекомендованы в [5.1] для полюсов различной формы. Для прямоугольных полюсов с поперечными размерами a и b достаточно точна формула

$$\Lambda = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0{,}307\delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0{,}307\delta}{\pi} \right).$$

2. Когда аналитический расчет проводимости затруднен вследствие сложной картины поля, реальное поле разбивается на простые геометрические фигуры, для которых существуют расчетные формулы. Так, для определения проводимости между прямоугольным полюсом и плоскостью поле разбивается на ряд простейших фигур, проводимость которых легко определяется аналитически. На рис. 5.3 фигура, определяемая точками *1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8*, представляет собой $^1/_4$ полого цилиндра; фигура, определяемая точками *0, 5, 8, 9*, — $^1/_4$ сферы, фигура, определяемая точками *1, 4, 10, 8, 5, 9*, — $^1/_4$ полой сферы. Результирующая проводимость определяется по сумме проводимостей отдельных фигур. Описанный метод называется методом вероятных путей потока.

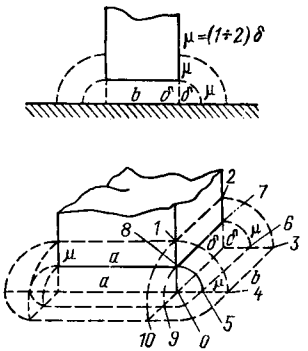


Рис. 5.3. К определению магнитной проводимости методом вероятных путей потока

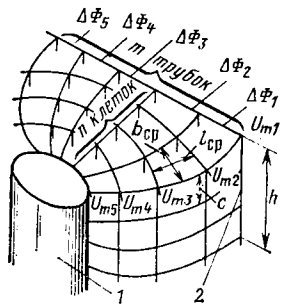


Рис. 5.4. К определению магнитной проводимости по картине поля

3. Если проводимость не может быть рассчитана первыми двумя методами, необходимо графически построить картину магнитного поля, после чего проводится расчет проводимости. На рис. 5.4 показана картина поля, построенная графически. Силовые линии магнитного поля выходят перпендикулярно поверхности полюсов (цилиндру *1* и плоскости *2*). Поле разбивается на трубки, в пределах которых поток одинаков: $\Delta\Phi_1=\Delta\Phi_2=\Delta\Phi_3=\Delta\Phi_4=\Delta\Phi_5$. Эквипотенциальные поверхности идут перпендикулярно силовым линиям и определяют распределение магнитных потенциалов U_{m1}—U_{m5}. Проводимость элемента трубки

$$\Lambda_{эл} = \mu_0 b_{ср} c / l_{ср},$$

где $b_{ср}$, $l_{ср}$, c — размеры элемента.

Полная проводимость определяется суммарной проводимостью всех трубок

$$\Lambda = \mu_0 hm/n,$$

где m — число трубок; n — число элементов (клеток) в трубке; h — высота полюса. Порядок построения картины поля рассмотрен в [5.6].

При расчете проводимости для потоков рассеяния удобно пользоваться магнитной проводимостью на единицу длины сердечника — удельной магнитной проводимостью. Для цепи рис. 5.1 проводимость для потоков рассеяния складывается из проводимости Λ_1 между гранями, обращенными друг к другу, проводимости Λ_2 между гранями, лежащими в одной плоскости, и проводимости Λ_3 между гранями, обращенными в разные стороны. Результирующая проводимость

$$\Lambda_{рез} = \Lambda_1 + 2\Lambda_2 + \Lambda_3.$$

Удельная магнитная проводимость на единицу длины λ, Гн/м, стержней с высотой l (вертикальных частей магнитопровода) равна

$$\lambda = \Lambda_{рез}/l.$$

Более подробно расчет проводимостей рассмотрен в [3.2, 5.1, 5.2].

5.2. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) **Расчет потоков рассеяния и индуктивности катушки без учета сопротивления стали.** Рассмотрим закон изменения потока и разности магнитных потенциалов вдоль стержней клапанной системы (рис. 5.5). МДС $F=Iw$ на единицу длины стержня равна F/l. Разность магнитных потенциалов между точками, расположенными на расстоянии x от основания, $U_{mx}=Fx/l$. Тогда элементарный поток рассеяния с участка dx, расположенного на расстоянии x от основания, можно найти с помощью (5.7):

$$d\Phi_{\sigma x} = \frac{F}{l} x\lambda\, dx,$$

где λ — удельная магнитная проводимость.

Произведя интегрирование в пределах от 0 до x, получим поток рассеяния, выходящий из стержня на длине x:

$$\Phi_{\sigma x} = \frac{F}{l}\lambda\,\frac{x^2}{2}.$$

Полный поток рассеяния, выходящий из стержня длиной l,

$$\Phi_{\sigma l} = \frac{F}{l}\lambda\,\frac{l^2}{2} = F\lambda l/2. \qquad (5.9)$$

Поток, проходящий через сечение стержня на расстоянии x от основания,

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_{\sigma l} - \Phi_{\sigma x} = \Phi_\delta + \frac{F}{2l}\lambda\,(l^2 - x^2). \qquad (5.10)$$

Поток в основании сердечника получим, положив $x=0$:

$$\Phi_0 = \Phi_\delta + \frac{F\lambda l}{2}. \tag{5.11}$$

Без учета сопротивления стали магнитопровода

$$\Phi_\delta = F\Lambda_\delta, \tag{5.12}$$

следовательно,

$$\Phi_0 = \Phi_\delta\left(1 + \frac{\lambda l}{2\Lambda_\delta}\right). \tag{5.13}$$

Изменение потока и разности магнитных потенциалов между стержнями показано на рис. 5.5. Разность магнитных потенциалов U_m между стержнями меняется по линей-

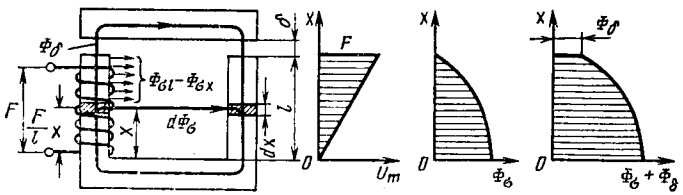


Рис. 5.5. К расчету магнитной цепи без учета магнитного сопротивления стали

$$\left[\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma l} - \Phi_{\sigma x} = \frac{F}{2l}(l^2 - x^2)\right]$$

ному закону и достигает максимального значения F у рабочего воздушного зазора. Магнитный поток согласно (5.10) меняется по закону параболы и достигает максимального значения у основания стержня. Индуктивность обмотки L определяется как отношение потокосцепления Ψ к току:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Psi_\delta + \Psi_\sigma}{I} = \frac{\Phi_\delta w}{I} + \frac{\Psi_\sigma}{I},$$

но

$$\Psi_\sigma = \int_0^l \frac{w}{l} x d\Phi_{\sigma x} = \frac{Fw}{l^2}\lambda \int_0^l x^2 dx = \frac{Fw}{3}\lambda l,$$

следовательно,

$$L = \frac{F\Lambda_\delta w}{I} + \frac{Fw}{3I}\lambda l = w^2\left(\Lambda_\delta + \frac{\lambda l}{3}\right). \tag{5.14}$$

В магнитной цепи по рис. 5.5 с различными витками обмотки сцеплен различный магнитный поток. Такая цепь

является разновидностью цепей с распределенными параметрами.

Рассмотрим систему, в которой кроме рабочего зазора δ_1 имеется паразитный зазор δ_2 (рис. 5.6). К зазорам $2\delta_1$ приложена разность магнитных потенциалов $+U_{m\delta_1}$, к зазорам $2\delta_2$ — разность магнитных потенциалов $-U_{m\delta_2}$. В соответствии с направлением разности потенциалов вверху поток рассеяния Φ_{σ_1} идет слева направо, а снизу направление потока Φ_{σ_2} меняется. В каком-то сечении АВ $U_m=0$ и поток рассеяния $\Phi_\sigma=0$. Положение этого сечения l_1 определяется уравнением

$$l_1 = l\frac{2\Lambda_2+\lambda l}{2(\Lambda_1+\Lambda_2+\lambda l)},$$

где λ — удельная проводимость;

$$\Lambda_1=\mu_0 S/(2\delta_1); \quad \Lambda_2=\mu_0 S/(2\delta_2).$$

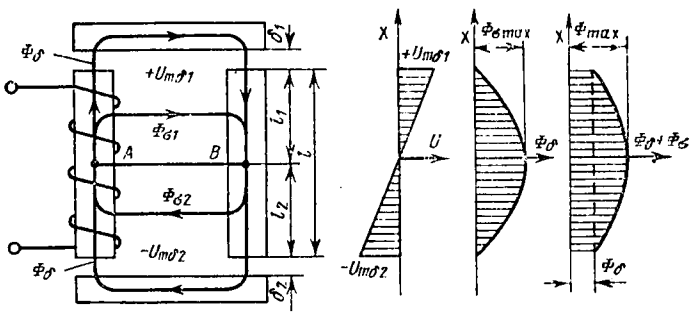


Рис. 5.6. Магнитная цепь с паразитным зазором

Распределение потоков и разности магнитных потенциалов показано на том же рисунке. Если $\delta_2=0$ $(\Lambda_2=\infty)$, то $l_1=l$ и мы имеем случай, показанный на рис. 5.5.

Таким образом, наличие паразитного зазора δ_2 вызывает смещение нулевого потенциала U_m и максимального потока Φ_{max} в промежуточное положение $l_1<l$.

В электромагнитах широко используется броневая магнитная система (рис. 5.7, *а*), в которой обмотка окружена внешним магнитопроводом. В электромагнитах постоянного тока внешний магнитопровод и якорь имеют форму цилиндра и выполняются из сплошной стали. Основными воздушными зазорами являются рабочий зазор δ и пара-

зитный зазор Δ. Рассмотрим распределение потока в магнитной цепи при Δ=0.

Рабочий поток Φ_δ определяется из (5.12). Элементарный поток рассеяния, выходящий из якоря на участке dx, расположенном на расстоянии x от торца якоря,

$$d\Phi_{\sigma x} = \frac{F}{l}(Z - x)\lambda dx,$$

где $F(Z-x)/l$ — разность магнитных потенциалов, создающая поток рассеяния $d\Phi_{\sigma x}$; λ — удельная проводимость для потоков рассеяния, равная $\mu_0 \cdot 2\pi/\ln(R/r)$ [5.1].

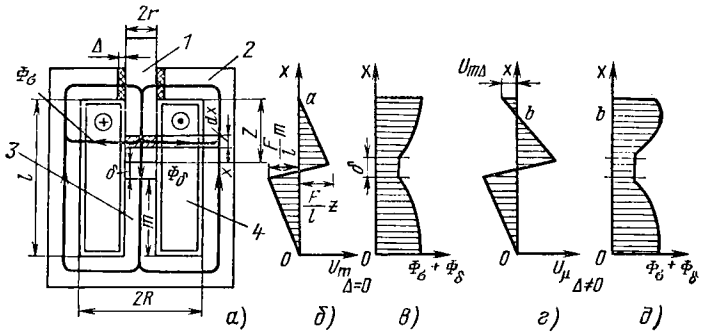


Рис. 5.7. Броневая магнитная система:

1 — якорь; *2* — внешний магнитопровод; *3* — стоп (упор); *4* — катушка

Поток рассеяния, выходящий из якоря на длине x,

$$\Phi_{\sigma x} = \int_0^x \frac{F}{l}\lambda(Z - x)\,dx = \frac{F}{l}\lambda\left(Zx - \frac{x^2}{2}\right); \qquad (5.15)$$

при $Z=x$

$$\Phi_{\sigma z} = \frac{F}{l}\lambda\frac{Z^2}{2}.$$

Полный поток в якоре при $Z=x$

$$\Phi_{0z} = F\Lambda_\delta + \frac{F}{l}\lambda\frac{Z^2}{2}. \qquad (5.16)$$

Аналогично определяется поток в основании стопа *3*:

$$\Phi_{0m} = F\Lambda_\delta + \frac{F}{l}\lambda\frac{m^2}{2},$$

где m — высота стопа.

Потокосцепление обмотки на длине Z определяется уравнением

$$\Psi_Z = \int_0^Z d\Phi_{\sigma x} \frac{w}{l}(Z-x) = \int_0^Z \frac{Fw}{l^2}\lambda (Z-x)^2 dx = Fw\lambda \frac{Z^3}{3l^2}. \tag{5.17}$$

Аналогично находим Ψ_m в основании стопа:

$$\Psi_m = Fw\lambda \frac{m^3}{3l^2}.$$

Полное потокосцепление

$$\Psi = \Psi_\delta + \Psi_Z + \Psi_m = Fw\left(\Lambda_\delta + \frac{\lambda Z^3}{3l^2} + \lambda \frac{m^3}{3l^2}\right).$$

Индуктивность обмотки

$$L = \frac{\Psi}{I} = w^2\left(\Lambda_\delta + \frac{\lambda Z^3}{3l^2} + \frac{\lambda m^3}{3l^2}\right). \tag{5.18}$$

Распределение потоков и разности магнитных потенциалов показаны на рис. 5.7, *б* и *в*.

При наличии зазора Δ точка с нулевой разностью потенциалов перемещается из положения *a* в положение *b*, что вызывает изменение распределения потока. Точка максимума потока также перемещается в положение *b* (рис. 5.7, *г*, *д*).

б) **Расчет магнитной цепи с учетом магнитного сопротивления стали без учета потока рассеяния.** Рассмотрим магнитную цепь в виде тороидального магнитопровода из магнитомягкой стали с равномерно распределенной обмоткой (рис. 5.8, *а*). Такие цепи часто встречаются в слаботочных электрических аппаратах. Если зазор δ мал по сравнению с $l_{ст}$, то можно пренебречь потоком рассеяния, так как разность магнитных потенциалов между любыми двумя точками тороидального магнитопровода незначительна. Это можно показать на электрической схеме замещения (рис. 5.8, *б*). Если E — ЭДС каждого элемента, то разность потенциалов между произвольно выбранными точками *a*, *b* и *a*, *d* схемы

$$U_{ab} = IR - E = \frac{nE}{nR}R - E = 0;$$

$$U_{ad} = I \cdot 3R - 3E = \frac{nE}{nR}3R - 3E = 0.$$

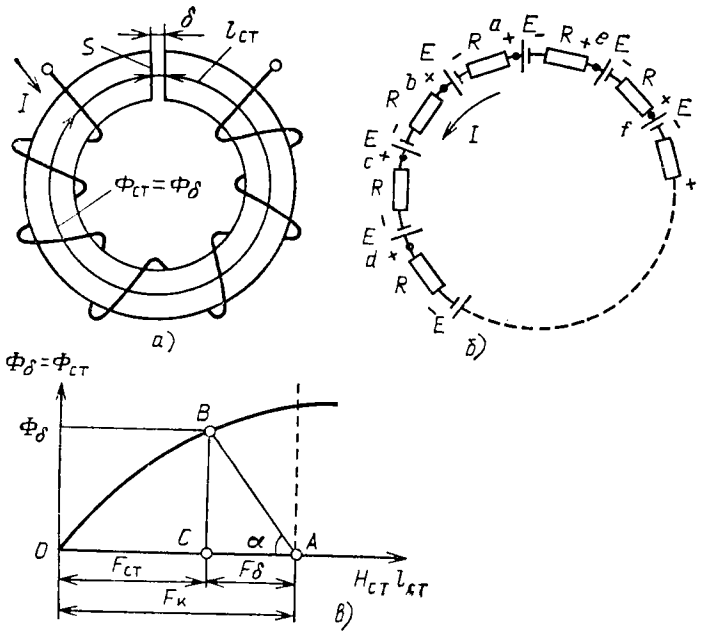


Рис. 5.8. Тороидальная магнитная система

Аналогично для тороидальной магнитной цепи с равномерно распределенной обмоткой разность магнитных потенциалов между любыми точками равна нулю.

Если задан магнитный поток в рабочем зазоре и известен материал магнитопровода, то МДС можно определить из выражения

$$F = \Phi_\delta R_{m\delta} + H_{ст}\, l_{ст}, \qquad (5.19)$$

где $R_{m\delta}$ — магнитное сопротивление зазора; $H_{ст}$ — напряженность магнитного поля в стали; $l_{ст}$ — средняя длина силовой линии в стали.

По известному значению потока Φ_δ находится магнитная индукция в стали $B_{ст}=\Phi_\delta/S$, а по значению $B_{ст}$ с помощью кривой намагничивания определяется $H_{ст}$. Тогда

$$F = \Phi_\delta \delta/(\mu_0 S) + H_{ст}\, l_{ст}. \qquad (5.20)$$

Если сечение магнитопровода меняется, то $H_{ст}$ нужно находить для каждого участка неизменного сечения

$$F = \Phi_\delta R_{m\delta} + \sum_{i=1}^{n} H_{cti}\, l_{cti}. \qquad (5.21)$$

Рассмотрим обратную задачу: определить магнитный поток в воздушном зазоре по известной МДС катушки $F_к = Iw_к$.

Задаваясь различными значениями магнитной индукции в стали $B_{ст}$, по кривой намагничивания материала магнитопровода можно определить $H_{ст}$. Поскольку длина и сечение магнитопровода известны, можно построить зависимость $\Phi_{ст} = \Phi_\delta = f(H_{ст} l_{ст})$ (рис. 5.8, *в*). Эта зависимость называется кривой намагничивания магнитной системы. Из точки A, координата которой соответствует $F_к$, проведем прямую под углом α. Угол α определяется из следующих соображений:

$$\frac{\Phi_\delta}{F_\delta} = \Lambda_\delta = \frac{l_\Phi m_\Phi}{l_F m_F} = \frac{m_\Phi}{m_F} \operatorname{tg} \alpha, \qquad (5.22)$$

где l_Φ — длина отрезка BC, соответствующая потоку Φ_δ; m_Φ — масштаб по оси потока; l_F — длина отрезка, соответствующая МДС F^δ; m_F — масштаб по оси МДС, или

$$\operatorname{tg} \alpha = \Lambda_\delta \frac{m_F}{m_\Phi}.$$

Отрезок AC в масштабе m_F равен МДС воздушного зазора F_δ; отрезок OC—МДС в стали $F_{ст}$. Ордината точки B пересечения луча AB и кривой $\Phi_\delta = f(H_{ст} l_{ст})$ дает искомый поток Φ_δ в воздушном зазоре δ.

Описанный способ может быть использован для магнитных цепей различного типа, если можно пренебречь потоками рассеяния.

в) **Расчет магнитной цепи с учетом магнитного сопротивления стали и потоков рассеяния.** В качестве примера рассмотрим клапанную систему с сосредоточенной МДС (рис. 5.9, *а*). В такой системе со всеми витками обмотки сцеплен один и тот же магнитный поток, что возможно только при тонкой (однослойной) обмотке. Поскольку в различных сечениях стержней потоки различны, то графоаналитический метод здесь непригоден и расчет магнитной цепи целесообразно проводить по участкам. Рассмотрим прямую задачу: определить МДС катушки при известном магнитном потоке в рабочем зазоре Φ_δ и известных размерах и материале магнитной системы. Разобьем стержни

на участки, длина которых по мере приближения к обмотке уменьшается. Чем ближе сечение магнитопровода к обмотке, тем больше магнитный поток и индукция, которая может достигать зоны насыщения ($B = 1{,}7 \div 2$ Тл). Составляем электрическую схему замещения (рис. 5.9, *б*).

1. Определяем разность магнитных потенциалов между точками *1* и *1′*:

$$U_{m11'} = U_{m\delta} + U_{mя} = \Phi_\delta / \Lambda_\delta + H_я\, l_я,$$

где $\Lambda_\delta = \mu_0 S_\delta / (2\delta)$; $H_я$ находится по кривой намагничивания материала для $B_я = \Phi_\delta / S_я$; $S_я$ — сечение якоря; $l_я$ — средняя длина силовой линии в якоре; $U_{m\delta}$ — падение магнитного потенциала на рабочем зазоре; $U_{mя}$ — падение магнитного потенциала на якоре.

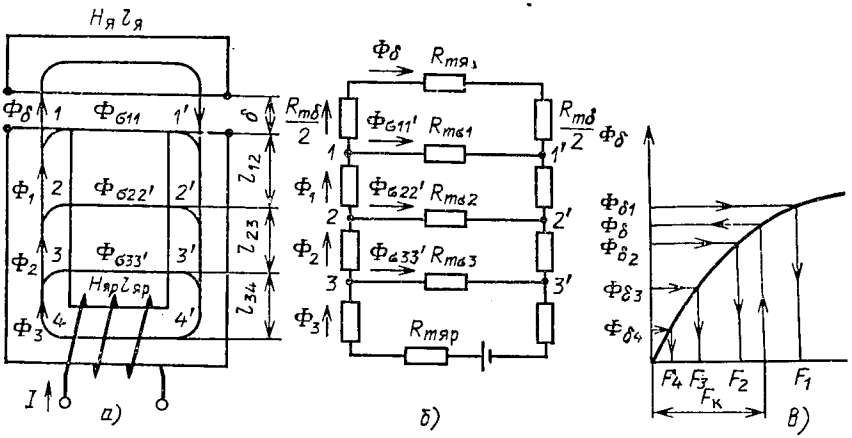


Рис. 5.9. К расчету клапанной магнитной системы с учетом рассеяния и магнитного сопротивления стали:

а — клапанная магнитная система; *б* — схема замещения; *в* — определение потока в рабочем зазоре Φ_δ по известной МДС катушки $F_к$

2. Вычисляем поток рассеяния между точками *1* и *1′*:

$$\Phi_{\sigma 11'} = U_{m11'} / R_{m\sigma_1} = U_{m11'} \lambda l_{12}.$$

Реально поток $\Phi_{\sigma 11'}$ распределен вдоль всего первого участка. Допуская определенную погрешность, считаем, что поток рассеяния сосредоточен между точками *1* и *1′*, а разность магнитных потенциалов на протяжении участков *1—2*, *1′—2′* постоянна и равна $U_{m11'}$.

Вдоль участка l_{12} магнитный поток не меняется

$$\Phi_1 = \Phi_\delta + \Phi_{\sigma 11'}.$$

3. Зная поток на участке, определяем падение магнитного напряжения на участках l_{12}, $l_{1'2'}$ и разность магнитных потенциалов между точками *2* и *2'*:

$$U_{m22'} = U_{m11'} + 2H_{12} l_{12}$$

(напряженность H_{12} одинакова в обоих стержнях).

Напряженность поля H_{12} на участке l_{12} находим с помощью кривой намагничивания по значению B_{12}, которое определяется по потоку

$$B_{12} = \Phi_1 / S_{ст}.$$

Аналогично рассматриваются остальные точки *3, 3', 4, 4'*.

4. $\Phi_{\sigma 22'} = U_{m22'} \lambda l_{23}$.

5. $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_{\sigma 22'}$; $B_{23} = \Phi_2 / S_{ст}$,

по B_{23} находится H_{23}.

6. $U_{m33'} = U_{m22'} + 2H_{23} l_{23}$.

7. $\Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_{\sigma 33'}$.

8. $B_{34} = \Phi_3 / S_{ст}$, по B_{34} находится H_{34}.

9. $U_{m44'} = U_{m33'} + 2H_{34} l_{34} = H_{яр} l_{яр}$.

10. $\Phi_{яр} = B_{яр} S_{яр} = \Phi_3$.

11. $F = \Sigma U_m = U_{m11'} + 2H_{12} l_{12} + 2H_{23} l_{23} +$

$+ 2H_{34} l_{34} + H_{44'} l_{44'}$.

В реальных конструкциях электромагнитов почти все пространство между стержнями (окно) занимают витки обмотки и приходится иметь дело с магнитной цепью с распределенной МДС. Решение такой задачи дано в [2.3]. В обратной задаче определяется магнитный поток в рабочем зазоре Φ_δ по известной МДС обмотки и размерам и материалу магнитной системы. В этом случае магнитное сопротивление стали неизвестно. Поэтому в первом приближении определяется значение магнитного потока без учета магнитного сопротивления стали

$$\Phi_{\delta_1} = F_к \Lambda_\delta.$$

Считая полученное значение Φ_{δ_1} заданным, решаем пря-

мую задачу и находим МДС катушки F_1. Эта МДС больше, чем МДС катушки $F_к$, так как к падению магнитного потенциала на рабочем зазоре прибавляется падение магнитного потенциала в стали.

Задаваясь рядом произвольных значений $\Phi_{\delta_2} < \Phi_{\delta_1}$; $\Phi_{\delta_3} < \Phi_{\delta_2}$; $\Phi_{\delta_4} < \Phi_{\delta_3}$, находим соответствующие значения МДС F_2, F_3, F_4. По этим значениям строится зависимость $\Phi_\delta = f(F)$ (рис. 5.9, *в*). Откладывая по оси абсцисс значение $F_к$, на оси ординат находим значение магнитного потока Φ_δ.

Из-за падения магнитного потенциала вдоль стержней разность магнитных потенциалов между ними уменьшается, что ведет к уменьшению потоков рассеяния. По мере уменьшения рабочего зазора растет поток Φ_δ, что также вызывает уменьшение разности магнитных потенциалов между стержнями и потоков рассеяния. Иногда при малом рабочем зазоре или притянутом положении якоря потоками рассеяния можно вообще пренебречь. Следует подчеркнуть, что по мере уменьшения зазора δ поток в стержнях увеличивается и индукция в них может достигать значения индукции насыщения B_s (см. рис. 5.2). Магнитную систему, в которой падение магнитного потенциала в стали более 10 % МДС катушки, принято называть насыщенной. В насыщенной магнитной системе прохождение потоков рассеяния создает дополнительное падение магнитного потенциала. При этом уменьшается разность магнитных потенциалов на рабочем зазоре, а следовательно, и полезный рабочий поток, и развиваемое электромагнитом усилие.

Решение прямой и обратной задачи можно упростить с помощью метода, использующего коэффициенты рассеяния. Под коэффициентом рассеяния понимается отношение магнитного потока в данном сечении с координатой x к магнитному потоку в рабочем зазоре:

$$\sigma_x = \Phi_x / \Phi_\delta.$$

Этот метод основывается на том, что при определении потоков рассеяния не учитываются падения магнитного потенциала в стали. Магнитный поток в любом сечении магнитопровода

$$\Phi_x = \sigma_x \Phi_\delta.$$

Для клапанного электромагнита (см. рис. 5.5, *а*) коэф-

фициент рассеяния

$$\sigma_x = \Phi_x/\Phi_\delta = \left[\Phi_\delta + \frac{F}{2l}\lambda(l^2 - x^2)\right]/\Phi_\delta = 1 + \\ + \frac{\lambda}{2\Lambda_\delta\, l}(l^2 - x^2).$$

Задаваясь различными значениями x, находим магнитные потоки Φ_1, Φ_2,..., Φ_n, проходящие через соответствующие сечения. По этим потокам находим средние значения потока на каждом участке магнитопровода: $\Phi_{1ср} = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$; $\Phi_{2ср} = (\Phi_2 + \Phi_3)/2$ и т. д. По среднему значению потока находим среднее значение индукции на каждом участке: $B_{1ср}$, $B_{2ср}$,..., $B_{nср}$. По индукции и кривой намагничивания находим напряженность поля на каждом участке. Полная МДС катушки

$$F_к = \Phi_\delta R_{m\delta} + \sum_{i=1}^{n} H_{iср}\, l_{iср},$$

где $H_{iср}$ — напряженность магнитного поля на участке i; l_i — длина i-го участка магнитопровода. Пример расчета магнитной системы с использованием коэффициентов рассеяния рассмотрен в [2.3]. Исследования показали, что если наибольшее значение индукции B_{max} равно или меньше индукции насыщения B_s, то метод расчета по коэффициентам рассеяния дает хороший результат. Если $B_{max} > B_s$, то необходимо использовать метод расчета по участкам.

5.3. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В электромагнитах постоянного тока ток в обмотке, определяющий ее МДС, при неподвижном или медленном перемещающемся якоре зависит только от ее активного сопротивления $I_у = U/R$.

При переменном напряжении ток в обмотке в основном определяется ее индуктивным сопротивлением, которое резко меняется при перемещении якоря. Магнитное сопротивление магнитопровода на переменном токе зависит не только от μ_a, l, S, но и от потерь в стали и наличия короткозамкнутых обмоток. С целью уменьшения потерь магнитопровод выполняется шихтованным.

а) **Магнитная система без активных потерь в стали и насыщения.** Примем, что напряжение и ток в обмотке, а также магнитные потоки изменяются по синусоидальному закону.

Рассмотрим вначале простейшую цепь без учета магнитного сопротивления стали и потерь в ней. Примем также, что потоки выпучивания в рабочем зазоре отсутствуют. Анализ проведем для электромагнита переменного тока с короткозамкнутой обмоткой (рис. 5.10), предположив, что ключ K разомкнут и эта обмотка не оказывает влияния на рассматриваемые процессы.

Напряжение сети, приложенное к обмотке w, уравновешивается активным и реактивным падением напряжения:

$$U^2 = (IR)^2 + (IX)^2,$$

где U и I — действующие значения.

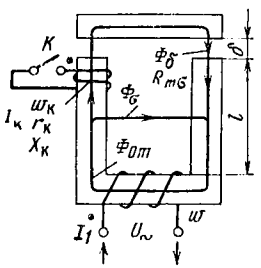


Рис. 5.10. Магнитная цепь электромагнита переменного тока с короткозамкнутой обмоткой

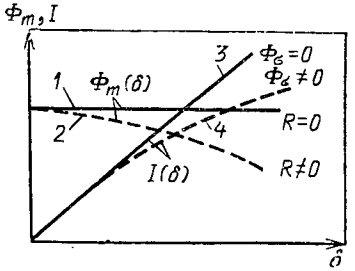


Рис. 5.11. Зависимость магнитного потока и тока от рабочего зазора

Воспользовавшись (5.12) и (5.8), получим

$$IX = I\omega L = I\omega\frac{\Psi}{I} = \omega w^2 I\Lambda_\delta = Fw\omega\frac{\mu_0 S}{2\delta}. \qquad (5.23)$$

Для обмотки напряжения, которая подключается непосредственно к источнику напряжения, активное сопротивление, как правило, значительно меньше реактивного: $R \ll \omega L$. Если пренебречь активным падением напряжения, то $U \approx IX$. Но так как

$$IX = 4{,}44fw\Phi_m = U, \qquad (5.24)$$

получим

$$\Phi_m = \frac{U}{4{,}44fw}, \qquad (5.25)$$

где Φ_m — амплитудное значение потока.

Таким образом, при принятых допущениях магнитный поток не зависит от рабочего зазора и при неизменном напряжении является постоянным (рис. 5.11, кривая *1*).

При $U \cong IX$ из (5.23), (5.24) следует

$$I = \frac{2U\delta}{\omega w^2 \mu_0 S} . \qquad (5.26)$$

Из (5.26) следует, что с ростом зазора δ уменьшается индуктивное сопротивление $X = \omega w^2 \mu_0 S/(2\delta)$, за счет чего при постоянном действующем значении напряжения происходит рост тока (рис. 5.11, кривая *3*). Если учесть активное сопротивление (при условии $R \ll \omega L$), то с ростом зазора ток будет расти, а поток Φ_m будет уменьшаться (рис. 5.11, кривые *2* и *3*)

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R^2}}{4{,}44 f w} . \qquad (5.27)$$

Таким образом, с ростом рабочего зазора поток падает, как это имеет место и в цепи постоянного тока. Однако в магнитной цепи переменного тока уменьшение потока является следствием роста падения напряжения на активном сопротивлении обмотки, а в цепи постоянного тока — роста магнитного сопротивления воздушного зазора.

Для учета потока рассеяния Φ_σ в схеме замещения параллельно сопротивлению $R_{m\delta}$, зависящему от зазора, необходимо включить неизменное сопротивление $R_{m\sigma}$ (рис. 5.9, *б*, 5.10). В результате при увеличении зазора ток в обмотке нарастает меньше, чем это следует из (5.26) (рис. 5.11, кривая *4*).

При составлении электрической схемы замещения магнитной цепи магнитное сопротивление воздушных промежутков $R_{m\delta}$, $R_{m\sigma}$ заменяется чисто активным сопротивлением.

В электромагнитах переменного тока для снижения пульсаций усилия на якоре используются короткозамкнутые витки и обмотки, которые также учитываются в схеме замещения.

Рассмотрим ту же клапанную систему на рис. 5.10, когда кроме обмотки w включена короткозамкнутая обмотка $w_к$ (ключ K замкнут). Примем, что активные потери и магнитное сопротивление стали равны нулю. Пусть короткозамкнутая обмотка имеет $w_к$ витков, активное сопротивление $r_к$ и индуктивное сопротивление $x_к$. Под воздействием переменного магнитного потока в обмотке $w_к$

наводится ЭДС $\underline{E}_к$, вызывающая ток $I_к$. Амплитуда тока

$$\underline{I}_{км} = \frac{\underline{E}_{км}}{\underline{z}_к} = \frac{-\omega_к \left(\frac{d\underline{\Phi}_\delta}{dt}\right)_m}{r_к + jx_к} = \frac{-j\omega_к \omega \underline{\Phi}_m}{r_к + jx_к}, \qquad (5.28)$$

где ω — угловая частота изменения потока; $\Phi_\delta = \Phi_m \sin\omega t$.

В магнитной цепи действуют МДС рабочей обмотки F_1 и короткозамкнутой обмотки $F_к$. Согласно второму закону Кирхгофа при принятых положительных направлениях токов

$$\underline{F}_1 = -\underline{F}_к + \underline{\Phi}_m R_{m\delta}. \qquad (5.29)$$

Воспользовавшись (5.28) и (5.29), получим

$$\underline{F}_1 = \underline{\Phi}_m R_{m\delta} + \frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} x_к \underline{\Phi}_m + j \frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} r_к \underline{\Phi}_m. \qquad (5.30)$$

Таким образом, МДС обмотки имеет две составляющие: первая $\Phi_m R_{m\delta}$ — падение магнитного потенциала на рабочем зазоре, и вторая

$$\Phi_m \left(\frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} x_к + j \frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} r_к \right)$$

— падение магнитного потенциала на эквивалентном магнитном сопротивлении короткозамкнутого витка. Составляющая $\Phi_m \frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} x_к$ совпадает по фазе с потоком, и поэтому $\frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} x_к$ называют активным магнитным сопротивлением $R_{mк}$. Составляющая $j\Phi_m \frac{w_к^2 \omega}{r_к^2 + x_к^2} r_к$ опережает поток на 90°, и сомножитель при $j\Phi_m$ называют реактивным магнитным сопротивлением $X_{mк}$. Часто короткозамкнутая обмотка состоит из одного витка и $w_к = 1$. В этом случае индуктивное сопротивление $x_к \sim w_к^2$ мало и им можно пренебречь. Тогда (5.30) принимает вид

$$\underline{F}_1 = \underline{\Phi}_m R_{m\delta} + j\underline{\Phi}_m \frac{\omega}{r_к}.$$

Таким образом, короткозамкнутый виток с чисто активным сопротивлением в схеме замещения представляется

чисто реактивным магнитным сопротивлением $X_{m\kappa}=\omega/r_{\kappa}$.

Векторная диаграмма магнитной цепи представлена на рис. 5.12. Вектор $\Phi_m R_{m\delta}$ — активное падение магнитного потенциала; $\Phi_m X_{m\kappa}$ — реактивное падение магнитного потенциала, а $\Phi_m Z_m = \Phi_m \sqrt{R_{m\delta}^2 + X_{m\kappa}^2}$ — полное падение магнитного потенциала, равное МДС обмотки. Амплитуда магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{I_m w}{\sqrt{R_{m\delta}^2 + X_{m\kappa}^2}} = \frac{I_m w}{Z_m}. \qquad (5.31)$$

Угол ψ определяется из соотношения $\operatorname{tg}\psi = X_{m\kappa}/R_{m\delta}$.

Векторная диаграмма электрической цепи дана на рис. 5.13. Напряжение сети U равно сумме противо-ЭДС — E

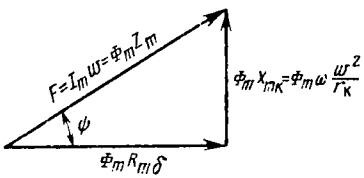


Рис. 5.12. Векторная диаграмма магнитной цепи рис. 5.10.

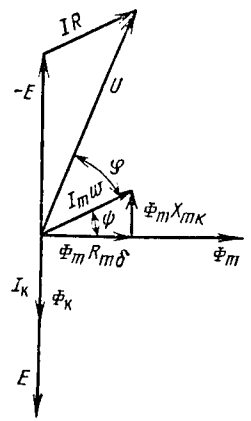


Рис. 5.13. Векторная диаграмма электрической цепи электромагнита с короткозамкнутой обмоткой

и активного падения напряжения в катушке IR. Угол сдвига фаз между током I_m в цепи и напряжением сети U равен φ.

Если $r_{\kappa}=\infty$ (т. е. обмотка разомкнута), то $X_{m\kappa}=0$. Если $r_{\kappa}=0$, то $X_{m\kappa}=\infty$ и магнитный поток через такую обмотку пройти не может. Он обтекает эту обмотку.

б) **Учет потерь в стали.** При протекании переменного потока по магнитопроводу в нем создаются активные потери за счет вихревых токов и гистерезиса (§ 2.2). Эти потери в схеме замещения могут быть представлены потерями в фиктивной короткозамкнутой обмотке, имеющей

только активное сопротивление. Параметры этой обмотки находятся из условия равенства потерь в стали $P_{ст}$ и потерь в активном сопротивлении такой фиктивной обмотки. При синусоидальном магнитном потоке ЭДС, наведенная в короткозамкнутой обмотке,

$$E_к = 4{,}44 f w_к \Phi_m = \omega w_к \Phi_m / \sqrt{2}, \tag{5.32}$$

откуда

$$w_к = E_к \sqrt{2} / (\omega \Phi_m).$$

Из условия равенства потерь можно записать

$$P_{ст} = E_к^2 / r_к; \qquad r_к = E_к^2 / P_{ст}. \tag{5.33}$$

Воспользовавшись (5.30), (5.32) и (5.33), можно получить

$$X_{mст} = \frac{\omega w_к^2}{r_к} = \frac{\omega w_к^2 P_{ст}}{E_к^2} = \frac{\omega w_к^2 P_{ст}}{4{,}44^2 f^2 w_к^2 \Phi_m^2} = \frac{2P_{ст}}{\omega \Phi_m^2}. \tag{5.34}$$

Таким образом, зная активные потери в стали и магнитный поток в магнитопроводе, можно определить реактивное магнитное сопротивление $X_{mст}$, учитывающее в схеме замещения потери от вихревых токов и гистерезиса.

Кроме реактивного магнитного сопротивления сталь обладает также активным магнитным сопротивлением R_m.

По аналогии с электрической цепью можно ввести понятия удельных активного ρ_R, реактивного ρ_X и полного ρ_Z магнитных сопротивлений стали:

$$R_m = \rho_R l / S; \tag{5.35}$$

$$X_{mст} = \frac{2P_{с г}}{\omega \Phi_m^2} = \frac{2P_0 \gamma l S}{\omega B_m^2 S^2} = \rho_X l / S; \tag{5.36}$$

$$Z_m = \rho_Z l / S, \tag{5.37}$$

где P_0 — мощность потерь на единицу массы магнитопровода, Вт/кг; γ — плотность материала магнитопровода, кг/м^3; l, S — длина, м, и сечение магнитопровода, м^2.

Зависимости ρ_R, ρ_X и ρ_Z от магнитной индукции для стали марки 1211 представлены на рис. 5.14. Так как

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}, \text{ то } \rho_Z = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_X^2}.$$

Если задан поток Φ_m и известны размеры участка S и l магнитопровода, то сначала находят индукцию $B_m = \Phi_m / S$. Затем по кривым, аналогичным приведенным на рис. 5.14, определяют ρ_R, ρ_X, ρ_Z и по (5.35)—(5.37) вычисляют магнитные сопротивления R_m, X_m, Z_m.

Расчет магнитной цепи переменного тока с учетом активных потерь

ведется по законам Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений. Если заданы напряжение на катушке, ее активное сопротивление и размеры магнитной цепи, то в первом приближении находят магнитные потоки без учета сопротивления стали и активного сопротивления катушки по (5.25). Затем составляется схема замещения магнитной цепи, в которой активное и реактивное магнитные сопротивления стали находятся для найденных магнитных потоков первого приближения. Расчет повторяется, и находятся потоки второго приближения, которые учитываются в схеме замещения. Расчет производится до тех пор, пока значения магнитных потоков в рабочем зазоре двух соседних приближений будут отличаться друг от друга не более чем на 10 %.

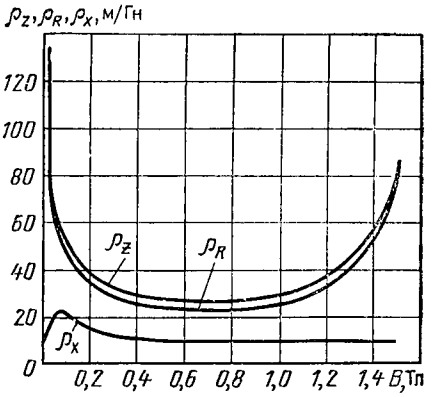


Рис. 5.14. Зависимость удельных магнитных сопротивлений стали от индукции

5.4. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

В результате расчета магнитной цепи определяется необходимая МДС обмотки. Обмотка должна быть рассчитана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить требуемую МДС, а с другой — чтобы ее максимальная температура не превышала допустимой для используемого класса изоляции.

В зависимости от способа включения различают обмотки напряжения и обмотки тока. В первом случае напряжение, приложенное к обмотке, постоянно по своему действующему значению. Во втором — сопротивление обмотки электромагнита намного меньше сопротивления остальной части цепи, которым и определяется неизменное значение тока.

а) **Расчет обмотки электромагнита постоянного тока.** На рис. 5.15 показаны магнитопровод и катушка электромагнита. Обмотка *1* катушки выполняется изолированным проводом, который наматывается на каркас *2*. Катушки могут быть и бескаркасными. В этом случае витки обмот-

ки скрепляются ленточной или листовой изоляцией либо заливочным компаундом.

Для расчета обмотки напряжения должны быть заданы напряжение U и МДС. Сечение обмоточного провода q находим исходя из потребной МДС:

$$F = \frac{U}{R} w = \frac{Uqw}{\rho l_{ср} w} = \frac{Uq}{\rho l_{ср}}, \qquad (5.38)$$

откуда

$$q = F\rho l_{ср}/U, \qquad (5.39)$$

где ρ — удельное сопротивление; $l_{ср} = \pi \frac{d_{об} + D_{об}}{2}$ — средняя длина витка (см. рис. 5.15); R — сопротивление обмотки, равное $\rho l_{ср} w/q$.

Из (5.38) следует, что при неизменной средней длине витка $l_{ср}$ и заданном ρ МДС определяется произведением Uq. Если при неизменном напряжении и средней длине витка требуется увеличить МДС, то необходимо взять провод большего сечения. При этом обмотка будет иметь меньшее число витков. Ток в обмотке возрастет, так как сопротивление ее уменьшится за счет уменьшения числа витков и увеличения сечения провода.

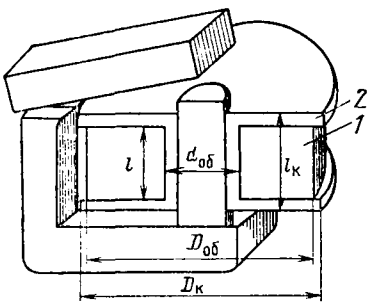


Рис. 5.15. К расчету обмотки электромагнита

По найденному сечению с помощью таблиц сортаментов находится ближайший стандартный диаметр провода.

Мощность, выделяющаяся в обмотке в виде тепла,

$$P = U^2/R.$$

Число витков обмотки при заданном сечении катушки $Q_{об}$ определяется коэффициентом заполнения по меди $f_м$:

$$f_м = wq/Q_{об}, \qquad (5.40)$$

где $Q_{об}$ — сечение обмотки по меди; wq — площадь, занимаемая медью обмотки.

Число витков $w = f_м Q_{об}/q$.

Тогда

$$P = \frac{U^2 q^2}{\rho l_{ср} f_м Q_{об}} = F^2 \frac{\rho l_{ср}}{f_м Q_{об}}. \qquad (5.41)$$

Таким образом, мощность, потребляемая обмоткой, прямо пропорциональна квадрату МДС и обратно пропорциональна коэффициенту заполнения $f_м$ и площади окна $Q_{об}$. Значения $f_м$ приведены в [5.3]. Обычно применяются рядовая намотка и намотка «навалом». В первой — провод укладывается рядами плотно виток к витку. Такие обмотки мотаются вручную или на специальных станках. Во второй — провод наматывается без соблюдения рядности.

При заданном диаметре провода МДС обмотки не зависит от способа укладки провода согласно (5.38). При намотке «навалом» число витков при том же окне уменьшится по сравнению с рядовой, ток пропорционально увеличится, а МДС обмотки останется без изменения. Мощность, потребляемая обмоткой, при намотке «навалом» увеличится, поскольку уменьшится коэффициент $f_м$.

При изменении питающего напряжения и неизменном окне обмотки должно иметь место равенство $U_1 q_1 = U_2 q_2$, так как ρ и $l_{ср}$ остаются неизменными. При этом согласно (5.38) МДС обмотки не меняется. Поскольку при переходе с одного напряжения на другое изменяется диаметр провода (а следовательно, и толщина изоляции), коэффициент заполнения обмотки $f_м$ также изменяется. Воспользовавшись (5.41), получим

$$P_1 f_{1м} = P_2 f_{2м}.$$

Если $U_1 < U_2$, то при переходе с напряжения U_1 на напряжение U_2 диаметр провода согласно (5.38) уменьшится. При меньшем диаметре провода из-за возросшей относительной толщины изоляции коэффициент заполнения уменьшится. Следовательно, при переходе на более высокое напряжение мощность, потребляемая обмоткой, увеличивается, что вызывает увеличение температуры обмотки. Если не было запаса по температуре нагрева, то это потребует снижения силы, развиваемой электромагнитом.

Для ориентировочной оценки нагрева обмотки можно пользоваться следующими рекомендациями. Опытным путем установлено, что в обмотке, выполненной проводом ПЭВ1 и ПЭВ2 на изоляционном каркасе, максимальная температура не превысит 105 °С, если на каждую единицу выделяемой мощности будет приходиться определенная боковая поверхность ($\sigma_0 = S_{бок}/P$ — удельная охлаждающая боковая поверхность). Размер этой поверхности зависит от геометрии обмотки (рис. 5.15):

$$\left.\begin{array}{l}\text{при } l/D < 1\\ \sigma_0 \geqslant 8\cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт};\\ \text{при } l/D = 1\\ \sigma_0 \geqslant 10\cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт};\\ \text{при } l/D > 1\\ \sigma_0 \geqslant 12\cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт},\end{array}\right\} \quad (5.42)$$

где l — длина обмотки; D — внешний диаметр обмотки.

Если в результате расчета окажется, что $\sigma < \sigma_0$, то температура обмотки будет выше допустимой. Из (5.41) следует

$$F = \sqrt{\frac{PQ_{об} f_м}{l_{ср}\rho}}. \quad (5.43)$$

Если при требуемой МДС мощность $P > S_{бок}/\sigma_0$, то необходимо либо уменьшить МДС обмотки, либо увеличить площадь окна $Q_{об}$.

После ориентировочной оценки нагрева обмотки необходимо определить максимальную температуру внутри ее по формулам § 2.4.

Для расчета обмотки тока исходными параметрами являются МДС и ток цепи $I_{ном}$. Число витков обмотки находится из выражения

$$w = F/I_{ном}. \quad (5.44)$$

Сечение провода можно выбрать исходя из рекомендуемой плотности тока, равной 2—4 А/мм² для продолжительного, 5 — 12 А/мм² для повторно-кратковременного, 13—30 А/мм² для кратковременного режимов работы. Эти значения можно увеличить примерно в 2 раза, если срок службы обмотки и электромагнита не превышает 500 ч. Площадь окна, занимаемого рядовой обмоткой, определяется числом витков и диаметром провода d:

$$Q_{об} = w\pi d^2/(4f_м).$$

Зная $Q_{об}$, можно определить среднюю длину витка, сопротивление обмотки и потери в ней. После этого может быть проведена оценка нагрева с помощью (5.42).

б) **Расчет обмотки электромагнитов переменного тока.** Исходными данными для расчета обмотки напряжения являются амплитуды МДС, магнитного потока и напря-

жение сети. Напряжение сети уравновешивается активным и реактивным падениями напряжения (см. § 5.3):

$$U^2 = (IR)^2 + (4{,}44 f w \Phi_m)^2, \qquad (5.45)$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока.

Поскольку ток и сопротивление могут быть рассчитаны только после определения числа витков, то (5.45) не позволяет сразу найти все параметры обмотки. Задача решается методом последовательных приближений.

Так как активное падение напряжения значительно меньше реактивного, то в начале расчета примем $R=0$. Тогда число витков обмотки

$$w = U/(4{,}44 f \Phi_m).$$

Так как при расчете w мы пренебрегли активным падением напряжения, то действительное число витков должно быть несколько меньше. Обычно

$$w_{\text{расч}} = (0{,}7 \div 0{,}8)\, U/(4{,}44 f \Phi_m).$$

Тогда

$$I = I_m w/(\sqrt{2}\, w_{\text{расч}}).$$

Сечение провода определяют, задавшись плотностью тока (§ 5.4а). Выбрав стандартный диаметр и способ укладки провода, находим коэффициент заполнения $f_м$ и площадь окна обмотки $Q_{об}$ из (5.40):

$$Q_{об} = w_{\text{расч}}\, \pi d^2/(4 f_м).$$

После этого определяем среднюю длину витка $l_{ср}$ и активное сопротивление обмотки

$$R = \rho l_{ср}\, w_{\text{расч}}/q.$$

Если после подстановки полученных данных в (5.45) левая часть отличается от правой более чем на 10 %, то необходимо варьировать число витков до получения удовлетворительного совпадения.

После расчета R проводится проверка обмотки на нагрев. Расчет ведется так же, как и для обмоток постоянного тока. Особенностью является нагрев магнитопровода за счет потерь от вихревых токов и гистерезиса. Отвод выделяемого в обмотке тепла через сердечник затруднен, и точка с максимальной температурой лежит на внутреннем радиусе обмотки. Для улучшения охлаждения стремятся увеличивать поверхность торцов катушки при уменьшении ее длины.

Если полное сопротивление обмотки электромагнита при любом рабочем зазоре значительно меньше полного сопротивления цепи, то ток в обмотке не зависит от положения якоря. Расчет таких обмоток ведется так же, как и для обмотки постоянного тока. Закон изменения магнитного потока в функции зазора в этом случае такой же, как и аналогичный закон для электромагнита постоянного тока, так как электромагнит работает при неизменной МДС (по действующему значению).

Полное падение напряжения на обмотке электромагнита

$$\Delta U = \sqrt{(IR)^2 + (4{,}44 f w \Phi_m)^2}.$$

Если обмотка напряжения питается от источника с напряжением U_2, отличным от номинального U_1, и сила тяги должна остаться той же, то обмоточные данные должны быть соответственно изменены. Значение МДС и угол сдвига между током и напряжением при этом считаются неизменными. Согласно [3.1] должны быть соблюдены соотношения:

$$\text{а)}\ \frac{I'_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}; \quad \text{б)}\ U_1 q_1 = U_2 q_2; \quad \text{в)}\ Q_1 f_1 = Q_2 f_2.$$

Полная мощность обмотки при переходе с одного напряжения на другое при соблюдении указанных условий не изменяется, так как $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

5.5. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

При заданном потоке падение магнитного потенциала уменьшается с уменьшением магнитного сопротивления. Так как магнитное сопротивление обратно пропорционально магнитной проницаемости, при данном потоке магнитная проницаемость материала магнитопровода должна быть возможно выше. Это позволяет уменьшить МДС обмотки и мощность, необходимую для срабатывания электромагнита, уменьшить размеры обмоточного окна и всего электромагнита. Уменьшение МДС при прочих неизменных параметрах уменьшает температуру обмотки.

Важным параметром материала магнитопровода является индукция насыщения. Тяговое усилие электромагнита пропорционально квадрату индукции. Поэтому чем выше индукция насыщения и, следовательно, больше допустимая индукция, тем больше тяговое усилие электромагнита при тех же размерах.

После обесточивания обмотки электромагнита в магнитной системе существует остаточный магнитный поток, который определяется ко-

эрцитивной силой материала магнитопровода и проводимостью рабочего зазора. Остаточный магнитный поток может оказаться таким, что произойдет так называемое залипание якоря. Во избежание этого явления требуется, чтобы материал обладал низкой коэрцитивной силой (малой шириной петли гистерезиса). Для устранения залипания в магнитной цепи предусматривается конечный зазор, создаваемый специальными немагнитными прокладками.

В электромагнитах переменного тока для компенсации активных потерь в стали (§ 5.3) приходится затрачивать дополнительную энергию. Это приводит к увеличению намагничивающего тока в обмотке. В связи с этим материалы, используемые для электромагнитов переменного тока, должны иметь малые потери на вихревые токи и гистерезис. Магнитопроводы для таких электромагнитов делаются шихтованными из пластин. Чем выше частота тока, тем меньше должна быть толщина пластин. Пластины магнитопровода изготавливаются из листовой стали штамповкой. Для быстродействующих электромагнитов постоянного тока также применяются шихтованные магнитопроводы, так как при этом уменьшаются вихревые токи, замедляющие нарастание потока (§ 5.7).

Наряду с указанными свойствами магнитные характеристики материалов должны быть стабильны (не изменяться от температуры, времени, при механических воздействиях).

Существенны низкая стоимость материала и его технологичность.

Подробные данные о материалах, применяемых в электрических аппаратах, приведены в [5.2].

5.6. СИЛА ТЯГИ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

Работа аппаратов, использующих электромагнит, зависит от тяговой силы, которую он развивает. Ниже приводится расчет этой силы.

а) **Энергетический баланс электромагнита постоянного тока.** Рассмотрим процесс возникновения магнитного поля в простейшем электромагните клапанного типа (рис. 5.16, *а*). После включения обмотки приложенное к ней напряжение источника U уравновешивается активным падением напряжения и противо-ЭДС самоиндукции:

$$U = ir + d\Psi/dt = ir + d(Li)/dt. \qquad (5.46)$$

При начальном неподвижном положении якоря индуктивность L постоянна и ток в цепи определяется уравнением $U = ir + L\frac{di}{dt}$. Решение этого уравнения имеет вид

$$i = I_y\left(1 - e^{-t/T}\right); \quad T = L/R; \quad I_y = U/r.$$

Потокосцепление $\Psi = Li$ также увеличивается с ростом тока.

Умножив обе части уравнения (5.46) на idt, получим

$$Uidt = i^2 rdt + id\Psi.$$

Для любого момента времени t справедливо равенство

$$\int_0^t Uidt = \int_0^t i^2 rdt + \int_0^{\Psi} id\Psi, \qquad (5.47)$$

где Ψ — значение потокосцепления к моменту времени t.

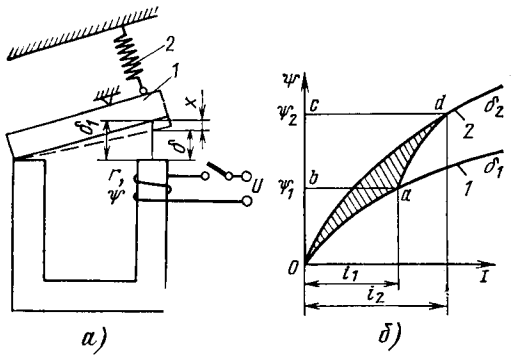


Рис. 5.16. К расчету силы тяги электромагнита

Левая часть (5.47) представляет энергию, которая затрачена источником питания. Первый член правой части есть потери энергии в активном сопротивлении цепи, второй — энергия, затраченная на создание магнитного поля. Пока сила тяги, развиваемая якорем *1* электромагнита, меньше силы возвратной пружины *2*, якорь неподвижен и потокосцепление нарастает при неизменном значении начального рабочего зазора δ_1. Зависимость $\Psi = f(i)$ при этом зазоре представлена кривой *1* рис. 5.16, *б*.

Допустим, что при достижении значения потокосцепления Ψ_1 сила тяги электромагнита стала больше возвратной силы пружины и под ее воздействием якорь переместился в положение, при котором рабочий зазор стал равен δ_2. Так как при меньшем зазоре проводимость рабочего зазора возрастает, то потокосцепление увеличится до значения Ψ_2. Ток при этом увеличивается по переходной кривой ad до значения i_2. Зависимость $\Psi = f(i)$ при зазоре δ_2 изображается кривой *2* на рис. 5.16, *б*.

До начала трогания якоря энергия магнитного поля, запасенная в цепи,

$$A_1 = \int_0^{\Psi_1} id\Psi = m_i m_\Psi S_{Oab},$$

где m_i — масштаб по оси тока, А/мм; m_Ψ — масштаб по оси потокосцепления, Вб/мм; S_{Oab} — площадь криволинейного треугольника Oab, мм^2.

После перемещения якоря значение потокосцепления изменится от Ψ_1 до Ψ_2. Энергия магнитного поля при этом возрастет на величину

$$A_2 = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} id\Psi = m_i m_\Psi S_{abcd},$$

где S_{abcd} — площадь криволинейной трапеции $abcd$.

При изменении зазора от значения δ_1 до значения δ_2 якорем электромагнита совершена механическая работа A_3. Энергия, накопленная в магнитном поле к концу хода якоря,

$$A_4 = \int_0^{\Psi_2} id\Psi = m_i m_\Psi S_{Ocd}.$$

На основании закона сохранения энергии можно записать

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \qquad (5.48)$$

Тогда механическая работа, совершенная якорем,

$$A_3 = A_1 + A_2 - A_4. \qquad (5.49)$$

Согласно рис. 5.16, *б* эта энергия равна

$$A_3 = m_i m_\Psi (S_{Oab} + S_{abcd} - S_{Ocd}) = m_i m_\Psi S_{Oad}. \qquad (5.50)$$

б) Расчет силы тяги электромагнита постоянного тока. Средняя сила тяги на ходе якоря от δ_1 до δ_2

$$P_{ср} = \frac{A_3}{\Delta x} = -\frac{A_3}{\Delta\delta} = -\frac{A_3}{\delta_2 - \delta_1},$$

где Δx — перемещение якоря, а $\Delta\delta$ — изменение зазора.

Таким образом, тяговая сила, развиваемая на ходе якоря Δx, равна работе, совершенной электромагнитом, деленной на это перемещение Δx. Если перейти на бесконечно

малое изменение зазора dx и учесть, что $x=\delta_1-\delta$ и $dx=-d\delta$, получим

$$P=-dA_3/d\delta. \qquad (5.51)$$

Сила тяги P действует в сторону уменьшения зазора.

Очевидно, что для каждого элементарного перемещения якоря можно определить свое значение A_3 и найти среднюю силу тяги, развиваемую на данном участке хода якоря.

Если при перемещении якоря ток в обмотке можно считать неизменным и равным I, то функции $\Psi(i)$ для различных зазоров представляются кривыми рис. 5.17.

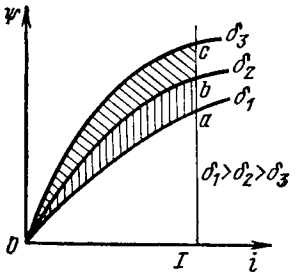


Рис. 5.17. Зависимость $\psi(i)$ при неизменном I_y в обмотке

Зависимость тяговой силы электромагнита от рабочего зазора при неизменном токе в обмотке называется статической тяговой характеристикой электромагнита. Если в электромагните вместо линейного перемещения якоря предусмотрен его поворот, то под статической тяговой характеристикой понимается зависимость момента M на якоре от угла его поворота α, снятая при неизменном токе в обмотке.

Для зазора $\delta_{1ср}=(\delta_1+\delta_2)/2$ силу тяги можно найти как

$$P_1=-\frac{m_i m_\Psi S_{Oab}}{\delta_2-\delta_1}.$$

Аналогично для зазора $\delta_{2ср}=(\delta_2+\delta_3)/2$

$$P_2=-\frac{m_i m_\Psi S_{Obc}}{\delta_3-\delta_2}.$$

Для снятия статической характеристики в рабочий зазор электромагнита ставится немагнитная прокладка, после чего к электромагниту подводится напряжение. С помощью динамометра постепенно увеличивается противодействующая сила до тех пор, пока якорь не оторвется от сердечника. Эта сила в момент отрыва будет равна статической силе тяги при зазоре, равном толщине прокладки. После этого меняют толщину прокладки и опыт повторяют при новом значении рабочего зазора.

Сила тяги, развиваемая электромагнитом, может быть рассчитана с помощью формулы Максвелла, полученной из

анализа магнитного поля, действующего на поверхности полюсов [5.1]. Если поле в рабочем зазоре равномерно и полюсы ненасыщены, то для электромагнита с одним рабочим зазором (см. рис. 5.16) формула Максвелла имеет вид

$$P = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_\delta^2}{\mu_0 S}, \tag{5.52}$$

где B_δ и Φ_δ — индукция, Тл, и магнитный поток, Вб, в рабочем зазоре; S — площадь полюса, м^2.

Если клапанный электромагнит имеет два рабочих зазора (см. рис. 5.9) при том же значении Φ_δ магнитного потока в зазоре, то сила тяги удваивается:

$$P = \Phi_\delta^2/(\mu_0 S).$$

в) **Аналитический расчет силы тяги для ненасыщенных электромагнитов.** Исходя из закона сохранения энергии можно показать, что энергия, полученная магнитным полем при элементарном перемещении якоря, определяется механической работой, произведенной якорем, и изменением запаса электромагнитной энергии [1.1]:

$$id\Psi = Pdx + dW_m, \tag{5.53}$$

где $id\Psi$ — элементарная энергия, полученная полем при перемещении якоря; Pdx — элементарная работа, произведенная якорем, dW_m — приращение магнитной энергии.

Из (5.53) легко получить

$$P = i\frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_m}{dx}.$$

Учитывая, что $dx = -d\delta$, а при отсутствии насыщения зависимость $\Psi = f(i)$ линейна и $W_m = 1/2(i\Psi)$, получаем

$$P = -i\frac{d\Psi}{d\delta} + \frac{1}{2} i\frac{d\Psi}{d\delta} + \frac{1}{2}\Psi\frac{di}{d\delta}. \tag{5.54}$$

Для статической тяговой характеристики ток в цепи при изменении зазора не меняется ($i = I$). Тогда $di/d\delta = 0$ и

$$P = -\frac{1}{2} I\frac{d\Psi}{d\delta}. \tag{5.55}$$

Рассмотрим расчет силы тяги применительно к клапанному электромагниту (см. рис. 5.5) с двумя рабочими зазорами. Полное потокосцепление складывается из потокосцепления Ψ_δ рабочего потока и потокосцепления рассея-

ния Ψ_σ. Поскольку ненасыщенная магнитная цепь линейна, потокосцепление, обусловленное рабочим потоком Φ_δ,

$$\Psi_\delta = \Phi_\delta w = Fw\Lambda_\delta.$$

Потокосцепление рассеяния

$$\Psi_\sigma = \int_0^l \frac{w}{l}\frac{F}{l} x^2 \lambda dx = Iw^2 \frac{\lambda l}{3}.$$

Подставив Ψ_δ и Ψ_σ в (5.55), получим

$$P = -\frac{1}{2}(Iw)^2\left[\frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} + \frac{1}{3}\frac{d(\lambda l)}{d\delta}\right].$$

Поскольку проводимость рассеяния от зазора δ не зависит, то $d(\lambda l)/d\delta = 0$, и сила тяги электромагнита

$$P = -\frac{1}{2}F^2\frac{d\Lambda_\delta}{d\delta}. \qquad (5.56)$$

Если известна зависимость $\Lambda_\delta = f(\delta)$, то $d\Lambda_\delta/d\delta$ находится аналитически. В уравнение (5.56) подставляется $d\Lambda_\delta/d\delta$ для интересующего нас значения зазора δ. Если Λ_δ определяется в результате построения картины поля, то производится расчет Λ_δ для ряда положений якоря, после чего строится зависимость $\Lambda_\delta = f(\delta)$ и производится графическое дифференцирование.

При достаточно малом зазоре для системы на рис. 5.5

$$\Lambda_\delta = \frac{\mu_0 S}{2\delta} \quad \text{и} \quad \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} = -\frac{\mu_0 S}{2\delta^2}.$$

Тогда сила тяги

$$P = \frac{1}{4}F^2\frac{\mu_0 S}{\delta^2}. \qquad (5.57)$$

Сила тяги электромагнита при одном рабочем зазоре (см. рис. 5.16) и той же МДС

$$P = -\frac{1}{2}F^2\frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} = -\frac{1}{2}F^2\frac{d\frac{\mu_0 S}{\delta}}{d\delta} = \frac{1}{2}F^2\frac{\mu_0 S}{\delta^2}.$$

Таким образом, при одной и той же МДС сила тяги электромагнита с одним рабочим зазором в 2 раза больше, чем при двух зазорах.

Согласно (5.57) сила тяги пропорциональна квадрату МДС обмотки, площади полюса и обратно пропорциональ-

на квадрату размера зазора. Зависимость $P=f(\delta)$ при неизменной МДС, называемая статической тяговой характеристикой, представлена на рис. 5.18 (кривая *1*). По мере уменьшения δ сила тяги резко возрастает и при $\delta=0$ стремится к бесконечности. В действительности при $\delta\to 0$ возрастает магнитный поток и увеличивается падение магнитного потенциала в магнитопроводе, причем только часть МДС оказывается приложенной к воздушному зазору. При выводе (5.57) мы считали, что вся МДС приложена к воздушному зазору.

Кривая *2* на рис. 5.18 изображает зависимость $P=f(\delta)$, снятую экспериментально. При больших зазорах, когда магнитный поток в магнитопроводе мал и падением магнитного потенциала в стали можно пренебречь, расчетная и экспериментальная кривые почти совпадают. При малых зазорах сила тяги имеет конечное значение.

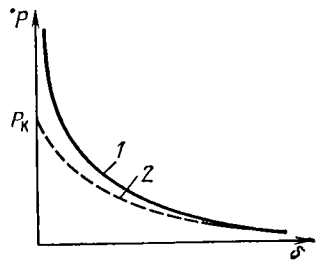


Рис. 5.18. Статическая тяговая характеристика электромагнита

Расхождение кривых *1* и *2* можно пояснить, если воспользоваться формулой Максвелла (5.52). При $\delta=0$ вся МДС тратится на проведение магнитного потока по стали магнитопровода, причем поток определяется его магнитным сопротивлением. Если пренебречь потоком рассеяния и принять, что магнитная цепь имеет неизменное сечение, то напряженность поля $H = F/l_{ст}$. Индукция B находится по кривой намагничивания материала магнитопровода, а сила — по (5.52). Так как магнитный поток имеет конечное значение, то и сила достигает конечного значения $P_к$.

Многочисленные исследования [5.1, 5.2] показали, что для расчета силы тяги можно пользоваться (5.56). При этом вместо F подставляется падение магнитного потенциала на рабочем зазоре F_δ:

$$P = -\frac{1}{2} F_\delta^2 \frac{\delta\Lambda_\delta}{d\delta} . \qquad (5.58)$$

Значение F_δ находят в результате расчета магнитной цепи.

Поскольку в формуле Максвелла (5.52) используется фактическая индукция в рабочем зазоре, то она учитывает

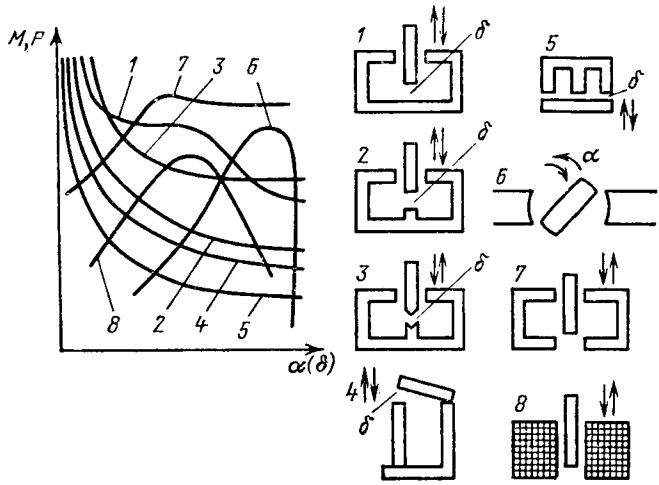


Рис. 5.19. Статические тяговые характеристики при различных исполнениях магнитных систем

магнитное сопротивление стали магнитопровода. По этой формуле можно рассчитать силу тяги, если магнитное поле равномерно и вектор индукции перпендикулярен поверхности полюсов. Если магнитное поле в зазоре неравномерно, используется формула Максвелла в интегральной форме [1.4].

Статические тяговые электромагнитные характеристики могут меняться в широких пределах путем изменения формы полюсов и конструктивного исполнения (рис. 5.19) [5.1, 3.2]. Выбор формы полюсов и исполнения магнитной системы диктуется характеристикой противодействующих сил или моментов. При большом ходе якоря — до 100 мм (длинноходовые электромагниты) применяются броневые магнитные системы *1—3*. При малом ходе якоря — до 10 мм (коротконаходовые электромагниты) преимущественно применяются клапанные магнитные системы *4* и *5*. При угловом перемещении якоря используются магнитные системы *6* с поворотным якорем. В системах *7* и *8* при симметричном положении якоря относительно центра катушки сила равна нулю. При выходе из этого положения сила меняет знак.

В броневом электромагните (см. рис. 5.7) при перемещении якоря меняется поток рассеяния, что вызывает по-

явление дополнительной составляющей силы тяги за счет производной потокосцепления рассеяния по зазору. Воспользовавшись (5.18) и (5.55), получим

$$P = -\frac{1}{2} F^2 \left[\frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} + \frac{d\frac{\lambda Z^3}{3l^2}}{dz} \frac{dZ}{d\delta} + \frac{d\frac{\lambda m^3}{3l^2}}{dZ} \frac{dZ}{d\delta} \right]. \quad (5.59)$$

Согласно рис. 5.7, *а* $Z = l - m - \delta$. При изменении рабочего зазора высота m части магнитопривода, которую называют стопом, остается постоянной. Сила тяги такого электромагнита без учета магнитного сопротивления стали

$$P = -\frac{1}{2} F^2 \left[\frac{\delta\Lambda_\delta}{d\delta} - \lambda \left(\frac{Z}{l} \right)^2 \right] = -\frac{1}{2} \left[- \left| \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} \right| - \lambda \left(\frac{Z}{l} \right)^2 \right]. \quad (5.60)$$

Если сравнить (5.60) с (5.56) для клапанного электромагнита, то можно видеть, что в броневом электромагните создается дополнительная сила за счет потоков рассеяния. В длинноходовых электромагнитах потоки рассеяния могут создавать до половины общего усилия. Благодаря этой особенности броневые электромагниты используются в тех случаях, когда требуется развить большое усилие при большом ходе. При этом начальное усилие создается в основном только за счет потоков рассеяния.

В том случае, когда падением потенциала в магнитопроводе пренебречь нельзя, необходимо учитывать не всю МДС, а только ту ее часть, которая приходится на рабочий зазор. Для точного расчета силы тяги необходимо графически построить картины поля электромагнита для различных зазоров при различных токах и построить кривые $\Psi(i)$, после чего воспользоваться методом § 5.6а.

г) **Сила тяги электромагнита переменного тока.** Рассмотрим клапанный электромагнит с двумя рабочими зазорами (см. рис. 5.9), сделав допущения: магнитное сопротивление стали, активное сопротивление обмотки и потери в стали равны нулю; напряжение, ток и магнитный поток меняются синусоидально.

В этом случае магнитный поток, а следовательно, потокосцепление не зависят от зазора ($d\Psi/d\delta = 0$) (5.21). Тогда мгновенное значение силы по (5.54)

$$P = \frac{1}{2} \Psi \frac{di}{d\delta}. \quad (5.61)$$

Учитывая, что

$$i = I_m \sin \omega t; \tag{5.62}$$

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t; \tag{5.63}$$

$$\Psi = \Psi_m \sin \omega t, \tag{5.64}$$

и подставив (5.62) и (5.64) в (5.61), получим

$$P = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \sin^2 \omega t. \tag{5.65}$$

Поскольку Ψ_m и $dI_m/d\delta$ при данном зазоре δ не зависят от времени, можно записать

$$\left.\begin{aligned} P &= P_m \sin^2 \omega t, \\ \text{где} \quad P_m &= \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta}. \end{aligned}\right\} \tag{5.66}$$

Производная $dI_m/d\delta$ может быть найдена графическим дифференцированием зависимости $I_m(\delta)$, которая получается из расчета магнитной цепи. Амплитуда потокосцепления $\Psi_m = \Phi_m w$ определяется приложенным напряжением из (5.25). Значение P_m можно найти с помощью (5.52).

Для системы с двумя зазорами получим амплитудное значение силы тяги

$$P_m = 2 \frac{B_m^2}{2\mu_0} S = \frac{B_m^2 S}{\mu_0} = \frac{\Phi_m^2}{\mu_0 S}. \tag{5.67}$$

Мгновенное значение силы тяги

$$P = \frac{\Phi_m^2 \sin^2 \omega t}{\mu_0 S} = P_m \sin^2 \omega t.$$

Поскольку при изменении зазора амплитуда магнитного потока не меняется, амплитуда силы тяги от зазора также не зависит. Однако если учесть активное сопротивление обмотки, то, как показано в § 5.3, с ростом зазора магнитный поток в системе уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды силы тяги.

Рассмотрим теперь изменение силы тяги во времени.

Так как $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$, то (5.66) можно записать

$$P = P_m \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m}{2} \cos 2\omega t; \tag{5.68}$$

мгновенную силу тяги можно выразить через среднюю:

$$p = P_{\text{ср}} - P_{\text{ср}} \cos 2\omega t$$

Мгновенное значение силы тяги пульсирует с двойной частотой по отношению к частоте тока и напряжения. Среднее значение силы тяги

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{P_m}{2}.$$

Для притяжения якоря необходимо, чтобы это среднее значение было больше противодействующего усилия пружины.

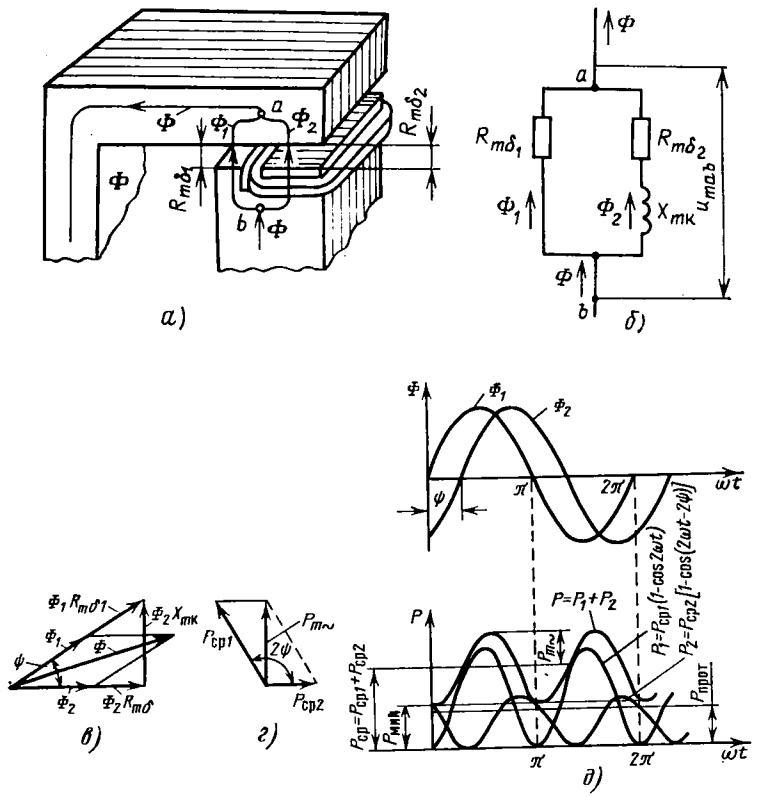


Рис. 5.20. Принцип работы электромагнита переменного тока с короткозамкнутым витком

Изменение силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени противодействующее усилие пружины становится больше силы тяги, что вызывает отрыв якоря от сердечника. Затем по мере нарастания силы тяги якорь вновь притягивается к сердечнику. В результате якорь непрерывно вибрирует, что нарушает работу контактов. Создается шум, расшатывается магнитная система. Для устранения вибраций в однофазных электромагнитах используются короткозамкнутые витки (рис. 5.20, *а*). Наконечник полюса расщепляется, и на его большую часть насаживается короткозамкнутый виток из меди или алюминия.

Примем, что магнитное сопротивление стали равно нулю и в магнитопроводе только один рабочий зазор. В соответствии с (5.3) наличие короткозамкнутого витка на пути потока Φ_2 создает реактивное магнитное сопротивление $X_{m\kappa}$, которое включается последовательно с магнитным сопротивлением $R_{m\delta 2}$ (рис. 5.20, *б*). Так как потоки Φ_1 и Φ_2 создаются одной и той же МДС, то поток Φ_2 отстает по фазе от потока Φ_1 на угол $\psi = \operatorname{arctg}(X_{m\kappa}/R_{m\delta 2})$.

В левой части полюса согласно (5.68) развивается сила тяги

$$P_1 = P_{m1} \sin^2 \omega t = P_{\text{ср}1} - P_{\text{ср}1} \cos 2\omega t.$$

В правой части полюса развивается сила тяги

$$P_2 = P_{m2} \sin^2 (\omega t - \psi) = P_{\text{ср}2} - P_{\text{ср}2} \cos (2\omega t - 2\psi).$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме сил P_1 и P_2 (рис. 5.20, *д*).

Если изобразить $P_{\text{ср}1} \cos 2\omega t$ и $P_{\text{ср}2} \cos (2\omega t - 2\psi)$ соответствующими векторами, то амплитуда переменной составляющей может быть найдена из векторной диаграммы (рис. 5.20, *е*):

$$P_{m\sim} = \sqrt{P_{\text{ср}1}^2 + P_{\text{ср}2}^2 + 2P_{\text{ср}1} P_{\text{ср}2} \cos 2\psi}. \qquad (5.69)$$

Электромагниты проектируются так, чтобы минимальная сила P_{min} была больше противодействующей силы пружины $P_{\text{пр}}$:

$$P_{min} = P_{\text{ср}} - P_{m\sim} > P_{\text{пр}}.$$

Чем меньше $P_{m\sim}$, тем меньше пульсации силы тяги. Из (5.69) следует, что $P_{m\sim} = 0$ при $P_{\text{ср}1} = P_{\text{ср}2}$ и $\psi = 90°$.

Угол сдвига фаз ψ зависит от магнитного сопротивления зазора под витком $R_{m\delta 2}$ и параметров короткозамкнутого

витка. Согласно § 5.3 имеем

$$\operatorname{tg}\psi = \omega/(r_к R_{mδ2}). \tag{5.70}$$

В соответствии с (5.70) угол $\psi=90°$ только при $r_к=0$ ($R_{mδ2}\neq 0$). Это значит, что $X_{mк}=\omega/r_к=\infty$ и поток $\Phi_2=0$, что приводит к увеличению вибрации якоря. Условия $P_{ср1}=P_{ср2}$ и $\psi=90°$ выполнить невозможно. Для ненасыщенных систем наименьшее значение переменной составляющей имеет место при $\Phi_1=\Phi_2$ и угле сдвига фаз $\psi=60\div 65°$. При этом $P_{ср1}\neq P_{ср2}$. Поскольку короткозамкнутый виток уменьшает поток под правой частью полюса, то с целью выравнивания значений Φ_1 и Φ_2 эта часть полюса делается больше (обычно 2/3).

Из (5.70) также следует, что чем больше рабочий зазор, а следовательно, и $R_{mδ2}$, тем меньше угол ψ. В связи с этим короткозамкнутый виток оказывает положительный эффект только при малых зазорах. При больших зазорах $R_{mδ2}\gg\omega/r_к$ и угол $\psi=0$. Следовательно, сдвига фаз между потоками Φ_1 и Φ_2 не будет. Индуктивное сопротивление короткозамкнутого витка $x_к$ также уменьшает угол ψ, поскольку при этом уменьшается $X_{mк}$ (§ 5.3). Обычно с учетом сопротивления $x_к$ $\psi=50\div 60°$.

В трехфазном электромагните, если в магнитном отношении все его три фазы симметричны и насыщение отсутствует, силы тяги, развиваемые под каждым полюсом, равны:

$$P_A = P_m \sin^2 \omega t; \quad P_B = P_m \sin^2\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right);$$

$$P_C = P_m \sin^2\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right).$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме этих сил:

$$P = P_A + P_B + P_C = \frac{3}{2} P_m. \tag{5.71}$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако вибрация якоря полностью не устраняется. При прохождении магнитного потока в каждой фазе через нуль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения равнодействующей силы

тяги всех трех фаз перемещается по телу якоря. Поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, то из-за этого возникает вибрация якоря.

д) **Сравнение статических тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока.** Для электромагнитов постоянного и переменного тока с двумя рабочими зазорами сила может быть рассчитана по (5.52) и (5.67):

$$P = \frac{B^2}{\mu_0} S \text{ или } P_m = \frac{B_m^2}{\mu_0} S.$$

Если площади S полюсов электромагнитов одинаковы и одинаковы максимальные значения B_m индукции в рабочих зазорах, то максимальное значение силы тяги электромагнита переменного тока равно силе тяги электромагнита постоянного тока. Поскольку среднее значение силы при переменном токе $P_{ср}=P_m/2$, то средняя сила, развиваемая электромагнитом переменного тока, в 2 раза меньше силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока.

Недостатком электромагнитов переменного тока является и вибрация якоря. Применение короткозамкнутого витка с целью уменьшения вибраций приводит к снижению среднего значения силы тяги.

Теперь сравним статические тяговые характеристики $P=f(\delta)$ электромагнитов постоянного и переменного тока клапанного типа. Как следует из (5.57), сила тяги изменяется обратно пропорционально квадрату зазора. В связи с этим клапанный электромагнит постоянного тока либо имеет малый рабочий ход якоря для обеспечения большей силы тяги, либо обмотка должна иметь большую МДС для создания необходимого магнитного потока при большом воздушном зазоре.

В электромагните переменного тока среднее значение силы тяги в 2 раза меньше, чем в электромагните постоянного тока при том же значении индукции. Однако с ростом зазора, с одной стороны, растет магнитное сопротивление рабочего зазора, с другой — растет ток в обмотке, так что поток в рабочем зазоре падает только за счет активного падения напряжения в обмотке. При большем зазоре создается большая МДС обмотки, которая обеспечивает необходимый поток в рабочем зазоре. В связи с этим электромагниты переменного тока могут работать при относительно больших ходах якоря.

Тяговые характеристики электромагнита переменного тока могут быть улучшены при питании обмотки выпрямленным переменным током [5.6].

5.7. ДИНАМИКА РАБОТЫ И ВРЕМЯ СРАБАТЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ

До сих пор мы рассматривали только статические характеристики, при которых принята неизменность тока в обмотке независимо от того, неподвижен якорь либо движется. В таком режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. В большинстве электромагнитов, имеющих обмотку напряжения, процесс срабатывания имеет динамический характер.

После включения обмотки электромагнита происходит нарастание магнитного потока до тех пор, пока сила тяги не станет равна противодействующей силе. После этого якорь начинает двигаться, причем ток и магнитный поток изменяются по весьма сложному закону, определяемому параметрами электромагнита и противодействующей силой. После достижения якорем конечного положения ток и магнитный поток будут продолжать изменяться до тех пор, пока не достигнут установившихся значений. Время срабатывания электромагнита — это время с момента подачи напряжения на обмотку до момента остановки якоря:

$$t_{ср} = t_{тр} + t_{дв},$$

где $t_{тр}$ — время трогания, представляющее собой время с начала подачи напряжения до начала движения якоря; $t_{дв}$ — время движения, т. е. время перемещения якоря из положения при зазоре $\delta_н$ до положения при зазоре $\delta_к$.

К моменту остановки якоря переходной процесс еще не закончен и ток в обмотке продолжает возрастать от значения I_0 до установившегося значения $I_у$.

Рассмотрим подробно все эти стадии для электромагнита постоянного тока с обмоткой напряжения.

а) **Время трогания.** После включения цепи напряжение источника уравновешивается активным падением напряжения и противо-ЭДС обмотки:

$$U = iR + d\Psi/dt. \qquad (5.72)$$

Так как в начальном положении якоря рабочий зазор относительно велик, то магнитную цепь можно считать не-

насыщенной, а индуктивность обмотки — постоянной. Поскольку $\Psi = Li$ и $L = \text{const}$, (5.72) можно преобразовать:

$$U = iR + Ldi/dt. \tag{5.73}$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$i = I_y\left(1 - e^{-t/T}\right), \tag{5.74}$$

где $I_y = U/R$ — установившееся значение тока; $T = L/R$ — постоянная времени цепи.

Ток обмотки, при котором начинается движение якоря, называется **током трогания** $i_{тр}$, а время нарастания тока от нуля до $i_{тр}$ — временем трогания $t_{тр}$.

Для момента трогания (5.74) можно записать в виде

$$i_{тр} = I_y\left(1 - e^{-t_{тр}/T}\right). \tag{5.75}$$

Решив (5.75) относительно $t_{тр}$, получим

$$t_{тр} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{тр}/I_y}. \tag{5.76}$$

Время трогания пропорционально постоянной времени T и зависит от отношения $i_{тр}/I_y$, увеличиваясь с приближением этого отношения к единице.

Как только начинается движение якоря (точка a на рис. 5.21), зазор уменьшается и его магнитная проводимость Λ_δ и индуктивность обмотки увеличиваются, поскольку $L = w^2\Lambda_\delta$. Так как при движении якоря индуктивность изменяется, то (5.72) примет вид

$$U = iR + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}. \tag{5.77}$$

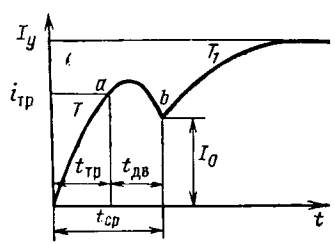


Рис. 5.21. Изменение тока в обмотке при включении

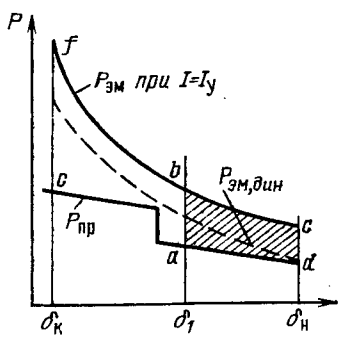


Рис. 5.22. К расчету времени движения якоря

При движении якоря $dL/dt>0$, поэтому i и di/dt начинают уменьшаться, поскольку сумма всех слагаемых (5.77) равна неизменному значению напряжения источника U. Зависимость тока от времени показана на рис. 5.21. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. В точке b, соответствующей крайнему положению якоря, уменьшение тока прекращается. Далее ток меняется по закону

$$I_0 e^{-t/T_1} + I_y\left(1 - e^{-t/T_1}\right),$$

где $T_1 = L_к/R_к$ — постоянная времени при $\delta = \delta_к$.

Начало движения якоря имеет место при $i_{тр} < I_y$ (рис. 5.21). При движении якоря ток вначале еще немного нарастает, а затем падает до значения, меньшего $i_{тр}$. Таким образом, во время движения якоря, когда зазор меняется от начального $\delta_н$ до конечного $\delta_к$, ток в обмотке значительно меньше установившегося значения I_y. Поэтому и сила тяги, развиваемая электромагнитом в динамике, значительно меньше, чем в статике при $I_y = \text{const}$.

б) **Время движения якоря электромагнита.** Физические процессы в электромагните описываются уравнениями

$$U = iR + d\Psi/dt;$$

$$P_{эм}\,dx = d\,(mv^2/2) + P_п\,dx,$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная сила, воздействующая на якорь; dx — путь, пройденный якорем; m — масса подвижных частей, приведенная к зазору; v — скорость перемещения якоря, приведенная к зазору; $P_п$ — противодействующее усилие пружины, приведенное к зазору.

Вторым уравнением описывается энергетический баланс в электромагните. Работа, произведенная электромагнитом, затрачивается на увеличение кинетической энергии его подвижных частей и преодоление противодействующих сил. Оба эти уравнения нелинейны и их решение затруднительно. В самом общем случае задача решена Н. Е. Лысовым [1.4].

Ориентировочно определить время движения якоря можно с помощью статической тяговой характеристики. На рис. 5.22 изображены статическая тяговая характеристика электромагнита $P_{эм} = f(\delta)$ и характеристика противодействующей силы $P_{пр} = f(\delta)$. Разность $P_{эм} - P_{пр}$ расходуется на сообщение ускорения подвижным частям электромагнита

$$P_{эм} - P_{пр} = m\frac{d^2x}{dt^2} = mv\frac{dv}{dx}. \qquad (5.78)$$

После интегрирования (5.78) получим

$$\int_0^x (P_{эм} - P_{пр})\, dx = mv^2/2. \qquad (5.79)$$

Скорость якоря в точке хода, соответствующей зазору δ_1,

$$v_1 = \sqrt{2\,\frac{m_P\, m_\delta\, S_{abcd}}{m}},$$

где m_P и m_δ — масштабы по соответствующим осям; S_{abcd} — площадь, пропорциональная работе движущей электромагнитной силы.

Зная скорость в любой точке хода, можно рассчитать время движения якоря на всех участках его перемещения.

Если принять участок $\delta_н$—δ_1 за элементарный, то время перемещения по нему якоря

$$\Delta t_1 = \frac{\delta_н - \delta_1}{v_{ср1}}; \qquad v_{ср1} = \frac{0 + v_1}{2}.$$

Полное время движения якоря от зазора $\delta_н$ до конечного $\delta_к$ определяется как сумма элементарных времен:

$$t_{дв} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots + \Delta t_n. \qquad (5.80)$$

Это время меньше действительного, так как статическая тяговая характеристика $P_{эм}$ располагается выше динамической (рис. 5.22) $P_{эм,дин}$.

После остановки якоря ток начнет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет установившегося значения $I_у = U/R$. При этом $T_1 > T$, поскольку конечный зазор $\delta_к$ меньше начального $\delta_н$, что сказывается на значении L, определяющем постоянную времени цепи. Так как в притянутом положении якоря зазор $\delta_к$ мал, то возможно насыщение магнитной системы. При этом закон нарастания тока может отличаться от экспоненциального, что необходимо учитывать при расчете времени установления потока.

в) **Отпускание электромагнита.** При размыкании цепи обмотки электромагнита магнитный поток в нем начинает уменьшаться из-за введения в цепь большого сопротивления дугового или тлеющего разряда между контактами. Магнитный поток уменьшается, и в момент, когда сила тяги электромагнита становится меньше усилия пружины, происходит отпускание якоря. Время отпускания $t_{отп}$ состоит из времени спада потока $t_{сп}$ от установившегося $\Phi_у$ до потока отпускания $\Phi_{отп}$ и времени движения $t_{дв}$.

Процесс отпускания описывается уравнением

$$U = iR_д + iR + L_к di/dt,$$

где $R_д$ — сопротивление искры (дуги); $L_к$ — индуктивность цепи обмотки при конечном зазоре.

Если положить, что $R_д$=const, то решение уравнения примет вид

$$i = \left(\frac{U}{R} + \frac{U}{R_д + R}\right) e^{-t/T_к} + \frac{U}{R_д + R},$$

где $T_к$ — постоянная времени, равная $L_к/(R_д+R)$. Обычно $R_д \gg R$. Тогда

$$i = \frac{U}{R} e^{-t/T_к}.$$

Так как $R_д$ велико, то $T_к$ очень мало. Процесс спада тока, а следовательно, и магнитного потока протекает очень быстро. Если сердечник, на котором размещается обмотка, сплошной и имеет большое сечение, то спад магнитного потока замедляется, так как в сердечнике возникают вихревые токи, поле которых стремится поддерживать спадающий поток (§ 5.7б). Это необходимо учитывать при расчете $t_{сп}$ [5.6].

После трогания якоря его движение происходит за счет усилия противодействующей пружины. Если это усилие постоянно и равно среднему значению $P_{пр,ср} = (P_к + P_н)/2$, где $P_к$, $P_н$ — усилия пружины при зазорах $\delta_к$ и $\delta_н$, то движение описывается уравнением

$$P_{пр,ср} = ma = m \frac{dv}{dt}$$

и ускорение

$$a = P_{пр,ср}/m.$$

Время движения $t_{дв} = \sqrt{2(\delta_н - \delta_к)/a}$ или

$$t_{дв} = \sqrt{2(\delta_н - \delta_к) m/P_{пр,ср}}. \qquad (5.81)$$

г) **Ускорение и замедление срабатывания и отпускания электромагнитов постоянного тока.** В большинстве случаев основную часть времени срабатывания составляет время трогания. Поэтому для изменения времени срабатывания воздействуют прежде всего на $t_{тр}$ (5.76).

Допустим, что ток трогания не изменяется (неизменна сила противодействующей пружины). Рассмотрим влияние активного сопротивления цепи при неизменных индуктивности и питающем напряжении. После включения электро-

магнита ток в обмотке изменяется по (5.74). Скорость нарастания тока

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} e^{-t/T}$$

и при $t=0$

$$\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0} = \frac{U}{L}.$$

Таким образом, скорость нарастания тока в момент включения не зависит от активного сопротивления цепи и определяется только питающим напряжением и индуктивностью цепи, $\operatorname{tg}\alpha = \text{const}$. Изменение тока во времени при различных значениях активного сопротивления цепи и $L = \text{const}$ показано на рис. 5.23, *б*. Следует отметить, что, поскольку $I_{y2} > I_{y1}$ и $\left.\frac{di}{dt}\right|_{t=0}$ одинакова для обоих случаев, кривая тока i_2 идет выше кривой тока i_1, что обеспечивает ускорение срабатывания при $R = R_2$. Это же следует из анализа (5.76). По мере увеличения сопротивления R установившийся ток $I_y = U/R$ приближается к току $I_{тр}$, знаменатель у логарифма в (5.76) стремится к нулю, а сам логарифм растет до бесконечно большого значения. Поэтому увеличение активного сопротивления ведет к росту времени трогания $t_{тр}$. Постоянная времени T с ростом сопротивления уменьшается ($T_1 < T_2$), и, следовательно, снижается время трогания, но влияние этого множителя в (5.76) меньше, чем влияние логарифма. Чем меньше активное сопротивление цепи, тем быстрее будет срабатывать электромагнит. Для уменьшения сопротивления R при неизменной индуктивно-

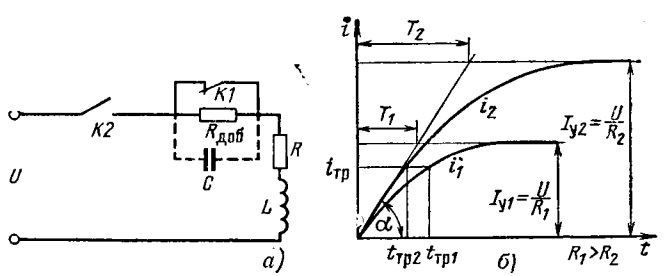


Рис. 5.23. Схема форсировки электромагнита (*а*); ток в обмотке электромагнита при различных активных сопротивлениях цепи (*б*)

сти L необходимо увеличивать сечение обмоточного провода q, что вызывает увеличение окна $Q_{об}$ и габаритов электромагнита в целом. Мощность, рассеиваемая в виде тепла, $P=U^2/R$ также возрастает, что требует увеличения поверхности охлаждения катушки. Ускорить срабатывание электромагнита при неизменных его габаритах можно с помощью специальных схем форсировки. Для того чтобы добиться эффекта уменьшения сопротивления R при неизменных размерах электромагнита, широко применяется схема форсировки (рис. 5.23, *а*). Введенный в схему добавочный резистор $R_{доб}$ шунтирован размыкающим контактом *K1*, связанным с якорем электромагнита. После замыкания контакта *K2* малое сопротивление обмотки R способствует быстрому нарастанию тока до тока трогания. После начала движения якоря контакт *K1* размыкается и в цепь вводится сопротивление $R_{доб}$, благодаря чему мощность P, выделяемая в обмотке, ограничивается в соответствии с выражением

$$P = \left(\frac{U}{R + R_{доб}}\right)^2 R. \qquad (5.82)$$

Иногда вместо контакта *K1* используется конденсатор C. В первый момент времени незаряженный конденсатор уменьшает падение напряжения на резисторе $R_{доб}$, благодаря чему обеспечивается форсировка электромагнита. В установившемся режиме ток в цепи ограничивается резистором $R_{доб}$. Емкость конденсатора, мкФ, рекомендуется брать равной

$$C = L \cdot 10^6/(RR_{доб}), \qquad (5.83)$$

где L — индуктивность обмотки электромагнита, Гн; R — ее активное сопротивление, Ом; $R_{доб}$ — сопротивление добавочного резистора, Ом.

Рассмотрим влияние питающего напряжения на время трогания. При уменьшении питающего напряжения уменьшается значение $I_у$ установившегося тока, что ведет к увеличению значения $\ln \frac{1}{1 - i_{тр}/I_у}$ в (5.76). При $i_{тр}=I_у$ время трогания $t_{тр}=\infty$.

Минимальное напряжение, при котором электромагнит может сработать, $U=i_{тр}R$. С ростом питающего напряжения время трогания уменьшается в связи с уменьшением $\ln \frac{1}{1 - i_{тр}/I_у}$ из-за роста $I_у$. Зависимость $t_{тр}(U)$ изображена на рис. 5.24.

Иногда возникает необходимость ускорить срабатывание уже готового электромагнита, не затрагивая его конструкцию и входящие в нее узлы и детали. Увеличение питающего напряжения без изменения активного сопротивления цепи ведет к ускорению срабатывания, но обмотка электромагнита может сгореть, если при номинальном значении питающего напряжения ее температура близка к предельно допустимой. В этих случаях рекомендуется при повышении питающего напряжения в цепь включать добавочный резистор, сопротивление которого обеспечивает неизменность тока $I_у$. Ускорение срабатывания происходит за счет уменьшения постоянной времени. Величина $\ln\frac{1}{1-i_{тр}/I_у}$ остается неизменной.

На рис. 5.25 показаны зависимости $i=f(t)$ при различных значениях T и при неизменном установившемся токе электромагнита. Кривые показывают, что чем больше постоянная времени, тем больше время трогания.

Отметим, что при прочих равных условиях увеличение натяжения противодействующей пружины ведет к росту $i_{тр}$ и $t_{тр}$.

Для создания электромагнитов замедленного действия применяется короткозамкнутая обмотка. Такая обмотка может иметь всего один виток в виде медной

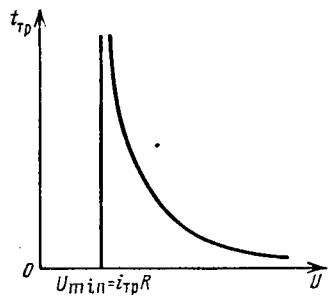


Рис. 5.24. Зависимость времени трогания от напряжения питания

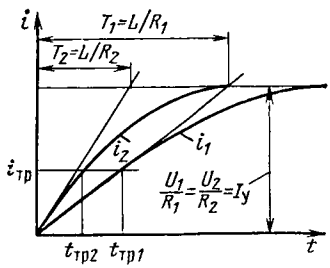


Рис. 5.25. Зависимости $i=f(t)$ при различных постоянных времени и неизменном значении $I_у$

или алюминиевой гильзы, надеваемой на сердечник электромагнита. Электромагнит с короткозамкнутой обмоткой w_2 показан на рис. 5.26.

При включении питающей обмотки и нарастании создаваемого ею магнитного потока в короткозамкнутой обмотке

наводится ЭДС. Последняя вызывает ток такого направления, при котором магнитный поток короткозамкнутой обмотки направлен встречно потоку питающей обмотки. Результирующий поток равен разности этих потоков. Скорость нарастания потока в электромагните уменьшается и время трогания увеличивается.

Если принять, что короткозамкнутая обмотка пронизывается тем же потоком, что и питающая (отсутствует рассеяние), то поток нарастает по экспоненте с суммарной постоянной времени T_1+T_2:

$$\Phi = \Phi_y\left(1 - e^{-t/(T_1+T_2)}\right), \qquad (5.84)$$

где $\Phi_y = \dfrac{U}{R} w_1 \Lambda_\delta$ — установившийся поток; $T_1 = L_1/R_1$; $T_2 = L_2/R_2$ — постоянные времени обмоток.

Если пренебречь потоками рассеяния, то индуктивности обмоток согласно (5.14) равны:

$$L_1 = w_1^2 \Lambda_\delta; \quad L_2 = w_2^2 \Lambda_\delta. \qquad (5.85)$$

При отпущенном якоре $\delta = \delta_н = \delta_{max}$ и значение Λ_δ мало. Суммарная постоянная времени T_1+T_2 невелика, и замедление электромагнита при срабатывании получается небольшим.

При отключении электромагнита можно считать, что ток I_{y1} в питающей обмотке практически мгновенно спадает до нуля из-за быстрого нарастания сопротивления дугового промежутка в отключающем аппарате K (рис. 5.27).

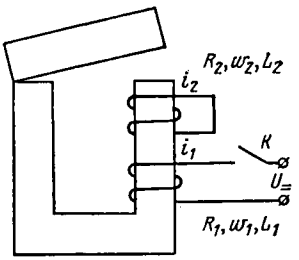


Рис. 5.26. Электромагнит замедленного действия

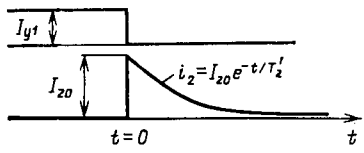


Рис. 5.27. Изменение тока в обмотках электромагнита при отключении

Поскольку магнитный поток в системе мгновенно не может измениться, в короткозамкнутой обмотке возникает ток $I_{20} = I_{y1} w_1/w_2$.

Спадание магнитного потока определяется процессом затухания этого тока. При спадании потока в короткозамкнутой обмотке наводится ЭДС и возникает ток, направленный так, что поток, создаваемый обмоткой w_2, препятствует уменьшению потока в системе. Замедленное спадание потока создает выдержку времени при отпускании.

Для короткозамкнутой обмотки и ненасыщенной магнитной системе можно записать

$$0 = i_2 R_2 + L_2' (di_2/dt). \tag{5.86}$$

Решив (5.86), получим

$$i_2 = I_{20} e^{-tR_2/L_2'}, \tag{5.87}$$

где I_{20} — начальное значение тока в короткозамкнутой обмотке (при $t=0$); L_2' — индуктивность короткозамкнутой обмотки при притянутом якоре. Очевидно, что $L_2' > L_2$. Умножив обе части (5.87) на Λ_δ', получим

$$\Phi = \Phi_y e^{-t/T_2'}, \tag{5.88}$$

где $\Phi_y = I_{20} w_2 \Lambda_\delta'$ — установившийся магнитный поток при включенной питающей обмотке.

Рабочий зазор при притянутом якоре в десятки и даже в сотни раз меньше, чем при отпущенном. Поэтому постоянная времени при притянутом якоре $T_2' \gg T_1 + T_2$, и замедление времени трогания при отпускании может достигать 10 с, тогда как задержка времени трогания при срабатывании составляет доли секунды.

После затухания тока i_2 в цепи устанавливается остаточный магнитный поток, определяемый кривой размагничивания материала магнитопровода и воздушным зазором (§ 5.8). Возможны случаи, когда остаточный магнитный поток создает силу притяжения большую, чем сила, развиваемая пружиной. Происходит так называемое залипание якоря, когда якорь остается в притянутом положении после отключения питающей обмотки. Для устранения залипания на торце сердечника или якоря устанавливается тонкая немагнитная прокладка. Наличие этой прокладки обеспечивает фиксированный достаточно малый конечный зазор $\delta_к \neq 0$, что приводит к снижению остаточного магнитного потока и устранению залипания.

В электромагнитах для реле времени магнитная система при притянутом положении якоря сильно насыщена. В этом

случае справедливо уравнение

$$0 = i_2 R_2 + w_2 d\Phi/dt. \qquad (5.89)$$

Решив (5.89) относительно t, получим

$$t_{тр} = -\frac{w_2^2}{R_2} \int_{\Phi_у}^{\Phi_{отп}} \frac{d\Phi}{i_2 w_2},$$

где $\Phi_{отп}$ — магнитный поток, при котором усилие пружины равно электромагнитной силе; $\Phi_у$ — начальное значение потока.

При отсутствии рассеяния $F_1 = F_2 (F_1 = i_1 w_1;\ F_2 = i_2 w_2)$, и тогда время трогания

$$t_{тр} = -\frac{w_2^2}{R_2} \int_{\Phi_у}^{\Phi_{отп}} \frac{d\Phi}{F_1}. \qquad (5.90)$$

Для определения этого интеграла рассчитывается зависимость магнитного потока в рабочем зазоре от МДС F_1 и строится зависимость $1/F_1 = f(\Phi)$. После этого (5.90) решается графическим интегрированием.

Выдержка времени при отпускании при прочих равных условиях определяется начальным потоком $\Phi_у$ уравнения (5.90). Этот поток определяется кривой намагничивания магнитной системы в замкнутом состоянии. Поскольку напряжение и ток в обмотке пропорциональны, зависимость

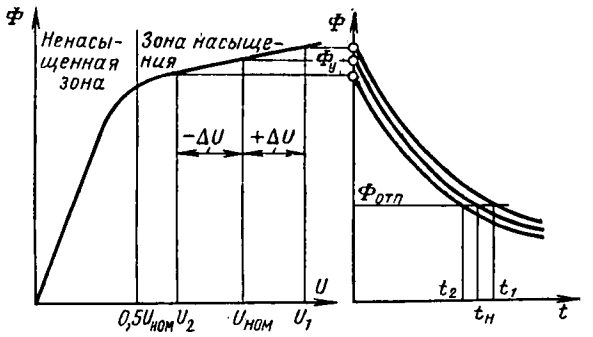


Рис. 5.28. Характеристика намагничивания магнитной системы и зависимость времени отпускания от напряжения питания

$\Phi(U)$ повторяет в другом масштабе зависимость $\Phi(Iw)$. Если система при номинальном напряжении не насыщена, то поток $\Phi_у$ сильно зависит от питающего напряжения. При этом выдержка времени также зависит от напряжения обмотки. Для независимости выдержки времени от питающего напряжения магнитная цепь электромагнитов делается сильно насыщенной. На рис. 5.28, *а* представлена кривая намагничивания магнитной системы $\Phi=f(U)$. В зоне насыщения колебания питающего напряжения на $\pm\Delta U$ ведут к незначительному изменению установившегося потока $\Phi_у$ и колебанию времени отпускания в пределах от t_1 до t_2. Вся рабочая зона лежит в области напряжений выше $0{,}5U_{ном}$. При работе в ненасыщенной зоне $U<0{,}5U_{ном}$ даже небольшие колебания питающего напряжения приводят к значительному изменению потока $\Phi_у$ и выдержки времени на отпускание.

В разнообразных схемах автоматики, в которых используются электромагниты, напряжение на их питающие обмотки может подаваться кратковременно. В этом случае для стабильности выдержки времени при отпускании необходимо, чтобы длительность приложения питающего напряжения была достаточна для достижения потоком установившегося значения. Это время называется временем подготовки или зарядки. Если длительность приложения напряжения меньше этого времени, то выдержка времени уменьшается. Время зарядки зависит от габаритов реле и составляет около 1 с.

На выдержку времени электромагнита влияет температура короткозамкнутой обмотки. Согласно (5.90)

$$t=-\frac{1}{R_{02}(1+\alpha_R\Theta)}\int_{\Phi_у}^{\Phi_{отп}}\frac{w_2 d\Phi}{i_2}.$$

Здесь t — время отпускания; Θ — температура нагретой короткозамкнутой обмотки.

Заводы-изготовители гарантируют работу таких электромагнитов в диапазоне температур от -40 до $+60$ °С. Если температура короткозамкнутой обмотки равна окружающей, то при указанном изменении температуры сопротивление, а следовательно, и выдержка времени изменятся почти в 1,5 раза. В среднем можно считать, что изменение температуры на каждые 10 °С ведет к изменению времени выдержки на 4 %. Зависимость выдержки времени от тем-

пературы является одним из основных недостатков электромагнитов с короткозамкнутой обмоткой.

д) **Динамика электромагнитов переменного тока.** Рассмотрим электромагнит переменного типа с ненасыщенным магнитопроводом. Пусть включение питающей катушки происходит в момент времени, когда приложенное напряжение проходит через нулевое значение. Можно записать

$$U_m \sin \omega t = iR + w d\Phi/dt. \tag{5.91}$$

Поскольку магнитопровод ненасыщен и магнитная цепь линейна,

$$i = \Phi w/L. \tag{5.92}$$

Подставив (5.92) в (5.91), получим уравнение

$$U_m \sin \omega t = \frac{R}{L} \Phi w + w \frac{d\Phi}{dt},$$

решив которое, найдем

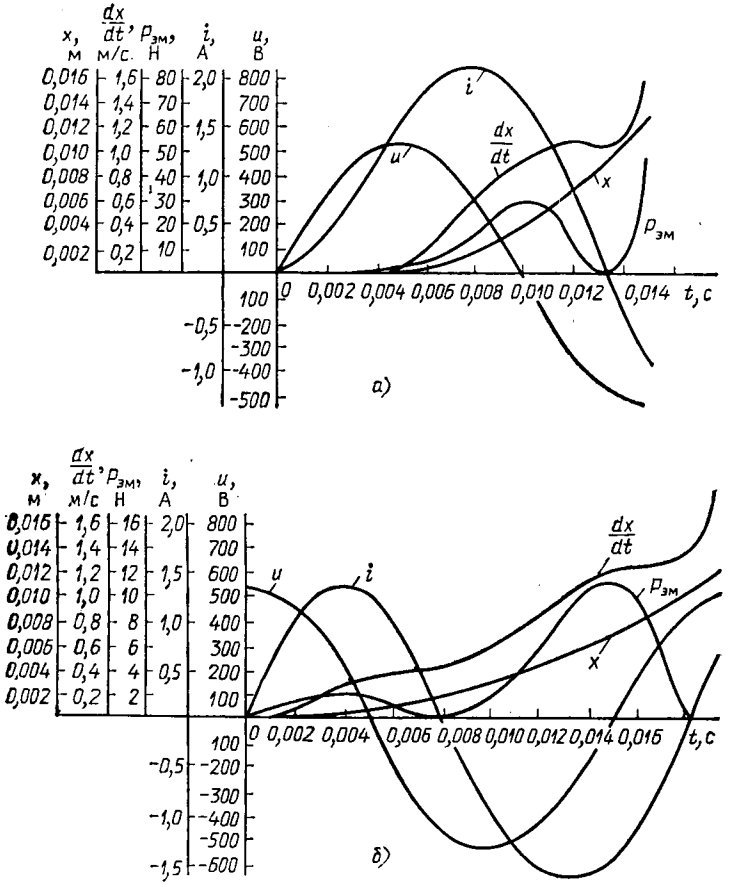
$$\Phi = \Phi_m \left(e^{-tR/L} - \cos \omega t\right), \tag{5.93}$$

где Φ_m — максимальное значение магнитного потока, определяемое (5.25) или (5.27).

Согласно (5.93) при $t=0$ поток в системе также равен нулю. Через время $t=\pi/\omega$ поток достигает наибольшего значения, поскольку постоянная составляющая магнитного потока складывается с переменной составляющей. Если пренебречь затуханием, то через полпериода поток достигнет величины, равной $2\Phi_m$. Кривая изменения магнитного потока во времени аналогична кривой изменения тока при КЗ (см. рис. 1.16).

По мере затухания постоянной составляющей магнитного потока пиковое значение потока будет уменьшаться, пока не достигнет Φ_m. Таким образом, в электромагните переменного тока наибольшие пиковые значения магнитного потока, а следовательно, и силы будут иметь место в начале включения, причем пиковые значения потока и силы наступают примерно через 0,01 с после начала включения (при частоте тока 50 Гц), чем обеспечивается малое время трогания.

Если начальное значение потока Φ_m достаточно близко к потоку насыщения, то удвоение потока к моменту $t=\pi/\omega$ ведет к насыщению магнитопровода и резкому возрастанию намагничивающего тока (из-за падения индук-



Рос. 5.29. Динамические характеристики электромагнита переменного тока, рассчитанные на ЭВМ

тивности обмотки). Форма намагничивающего тока резко отличается от синусоидальной.

При включении обмотки в момент времени, соответствующий нулю тока (потока), постоянная составляющая не появляется и пиковое значение потока появляется через $^1/_4$ периода после включения. Таким образом, в электромагнитах переменного тока обеспечивается быстрое трогание электромагнита без применения специальных мер.

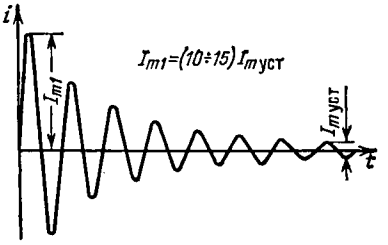


Рис. 5.30. Зависимость тока в обмотке от времени при включении электромагнита переменного тока

Аналитический расчет динамических характеристик электромагнитов переменного тока очень труден и может быть обеспечен применением ЭВМ.

На рис. 5.29 показаны динамические характеристики электромагнита переменного тока частотой 50 Гц с ходом якоря 6 мм, полученные на ЭВМ. Здесь x — перемещение якоря; dx/dt — скорость его перемещения; $P_{эм}$ — сила тяги электромагнита; i — ток обмотки; u — напряжение на обмотке. Включение обмотки происходит в момент прохождения питающего напряжения через нуль (рис. 5.29, *а*). Из приведенных кривых видно, что ток в обмотке имеет апериодическую составляющую. Кривая силы тяги $P_{эм}$ достигает максимума через 0,01 с после включения и имеет довольно сложный характер. Если включение происходит при амплитудном значении напряжения на обмотке (рис. 5.29, *б*), то первый максимум силы наступает через 0,004 с после включения. Второй максимум $P_{эм}$ превышает первый в 6 раз и достигается через 0,015 с после включения обмотки. Таким образом, в первом случае время срабатывания электромагнита составляет около 0,011, во втором случае 0,0135 с (ход якоря $x_{ср}=6$ мм).

Необходимо отметить, что в момент включения электромагнита рабочий зазор в магнитной цепи велик, что вызывает согласно (5.22) большой намагничивающий ток, в десятки раз больший, чем ток при притянутом положении якоря.

Зависимость тока в обмотке от времени при включении электромагнита переменного тока приведена на рис. 5.30.

5.8. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

а) **Общие сведения.** Для создания постоянного магнитного поля в некоторых электрических аппаратах используются постоянные магниты. Постоянные магниты изготавливаются из магнитотвердых материалов, т. е. материалов, имеющих широкую петлю гистерезиса. В постоянных магнитах для создания магнитного поля не требуется непрерывное подведение электроэнергии. Определенная энергия тратится только на первоначальное намагничивание постоянного магнита. Магнитное поле магнита сохраняется бесконечно долго без затраты энергии извне.

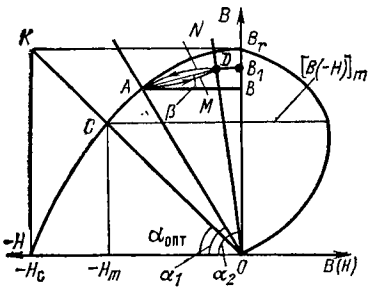


Рис. 5.31. Кривая размагничивания постоянного магнита

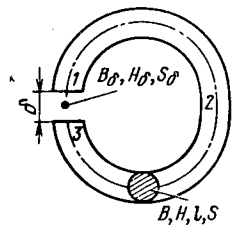


Рис. 5.32. Постоянный магнит тороидальной формы

Для намагничивания постоянного магнита в его теле создается магнитное поле, напряженность которого во много раз превышает коэрцитивную силу H_c магнитотвердого материала. После снятия этого поля материал постоянного магнита остается намагниченным. Намагничивание постоянных магнитов осуществляется в специальных намагничивающих установках, позволяющих создавать сильное магнитное поле с напряженностью до 400 кА/м.

Состояние постоянного магнита описывается участком $0—(—H_c)$ петли гистерезиса (рис. 5.31), называемым кривой размагничивания.

Рассмотрим постоянный магнит в форме тороида с малым зазором δ (рис. 5.32). Благодаря тороидальной форме и малому зазору потоками рассеяния в таком магните можно пренебречь (§ 5.2).

При малом зазоре магнитное поле в нем можно считать равномерным. Если пренебречь потоком выпучивания, то

Магнитная индукция B в зазоре и внутри магнита B одинакова. По закону полного тока при интегрировании по замкнутому контуру *1—2—3—1* получим

$$H_\delta \delta + Hl = 0,$$

откуда

$$H_\delta = -Hl/\delta. \tag{5.94}$$

Таким образом, напряженность поля в зазоре направлена встречно напряженности в теле магнита. Для электромагнита постоянного тока с такой же магнитной цепью без учета насыщения можно написать

$$H_\delta = i\omega/\delta. \tag{5.95}$$

Сравнивая (5.94) и (5.95), можно видеть, что МДС постоянного магнита, создающая поток в рабочем зазоре, является произведением напряженности в теле магнита на его длину, взятым с отрицательным знаком $-Hl$.

Так как $B=B_\delta$; $H_\delta=B_\delta/\mu_0$ и $H_\delta=-Hl/\delta$; $\Lambda_\delta=\mu_0 S/\delta$, получим

$$B = -\frac{Hl}{\delta}\mu_0 = \frac{Hl}{\delta}\mu_0\frac{S}{S} = -H\frac{\Lambda_\delta l}{S}$$

или

$$-\frac{B}{H} = \frac{\Lambda_\delta l}{S}, \tag{5.96}$$

где S — площадь полюса, равная площади рабочего зазора; Λ_δ — проводимость воздушного зазора.

Уравнение (5.96) есть уравнение прямой, проходящей через начало координат во втором квадранте под углом α_1 к оси $-H$. С учетом масштабов индукции m_B и напряженности m_H угол α определяется из равенства

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{m_H}{m_B}\frac{\Lambda_\delta l}{S}. \tag{5.97}$$

Так как B и H связаны кривой размагничивания, то пересечение указанной прямой с кривой размагничивания (точка A на рис. 5.31) определяет состояние постоянного магнита при заданном зазоре.

При замкнутой цепи $\delta=0$; $\operatorname{tg}\alpha=\infty$; $\alpha=90°$ и $B=B_\delta=B_r$. С ростом δ проводимость рабочего зазора и $\operatorname{tg}\alpha$ уменьшаются, индукция в рабочем зазоре падает, а напряженность поля внутри магнита увеличивается.

Магнитные материалы, применяемые для электромагнитных аппаратов постоянного и переменного тока, имеют достаточно высокие значения B_r и небольшие значения H_c. Если в притянутом положении якоря воздушный зазор в магнитной цепи достаточно мал, то после отключения катушки в рабочем зазоре останется $B_{ост}$, которая определяется кривой размагничивания и $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{m_H}{m_B}\dfrac{\Lambda_\delta l}{S}$.

Для избежания этого явления в магнитную цепь вводится немагнитный зазор (латунные прокладки, штифты). При этом проводимость Λ_δ уменьшается, точка A спускается вниз и остаточный поток падает.

Важной характеристикой постоянного магнита является энергия W_δ магнитного поля в рабочем зазоре. Если это поле равномерно, то

$$W_\delta = \frac{B_\delta H_\delta}{2} S\delta. \tag{5.98}$$

Подставляя значение H_δ из (5.94), получаем

$$W_\delta = \frac{B(-H)}{2} Sl = \frac{B(-H)}{2} V_м = W_м, \tag{5.99}$$

где $V_м$ — объем магнита; $W_м$ — его магнитная энергия.

Таким образом, энергия в рабочем зазоре равна энергии внутри магнита.

Зависимость произведения $B(-H)$ от индукции B показана на рис. 5.31. Очевидно, что для точки C, в которой произведение $B(-H)$ максимально, энергия в воздушном зазоре также максимальна. С точки зрения использования энергии постоянного магнита эта точка является оптимальной. Ордината точки C определяется пересечением с кривой размагничивания луча OK, проведенного через точку с координатами $-H_c$ и B_r.

Рассмотрим влияние зазора δ на индукцию B (рис. 5.32). Если намагничивание магнита производилось при зазоре δ_1, то после снятия внешнего намагничивающего поля в теле магнита установится индукция, соответствующая точке A. Положение этой точки определяется зазором δ_1 и соответствующим ему углом α_1.

Уменьшим зазор до значения $\delta_2 < \delta_1$, тогда

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{m_H \mu_0 l}{m_B \delta_1} < \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{m_H}{m_B}\mu_0\frac{l}{\delta_2}.$$

При уменьшении рабочего зазора индукция в теле магнита возрастает, однако ее нарастание идет не по кривой размагничивания, а по ветви частного цикла гистерезиса *AMD*. В результате значение индукции B_1 определяется точкой пересечения этой ветви с лучом, проведенным под углом α_2 к оси $-H$ (точка *D*).

Если мы снова увеличим зазор до значения прежнего δ_1, то индукция будет падать до значения *B*, причем ее спадание будет описываться ветвью *DNA* частного цикла гистерезиса. Обычно частная петля *AMDNA* достаточно узка и ее заменяют прямой *AD*, которую называют прямой возврата. Наклон прямой возврата к горизонтальной оси $+H$ (угол β) определяется коэффициентом возврата $\rho = \Delta B/\Delta H$:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta B}{\Delta H}\frac{m_H}{m_B} = \rho\frac{m_H}{m_B}.$$

Кривая размагничивания материала постоянного магнита обычно не приводится полностью, а задается значениями индукции насыщения B_s, остаточной индукции B_r, коэрцитивной силы H_c и коэффициентом возврата ρ. Для большинства магнитотвердых материалов кривая размагничивания может быть аппроксимирована формулой

$$B = \frac{H + H_c}{\frac{H_c}{B_r} + \frac{H}{B_s}}. \qquad (5.100)$$

Характеристики магнитотвердых материалов, применяемых в электрических аппаратах, приведены в [5.1].

б) **Определение потока в рабочем зазоре для заданной магнитной цепи.** Магнитный поток $\Phi_р$ в рабочем зазоре постоянного магнита отличается от потока в нейтральном сечении (середине магнита) Φ_0 из-за наличия потоков рассеяния Φ_σ и выпучивания $\Phi_{вып}$ (рис. 5.33).

Поток в нейтральном сечении

$$\Phi_0 = \Phi_р + \Phi_{вып} + \Phi_\sigma. \qquad (5.101)$$

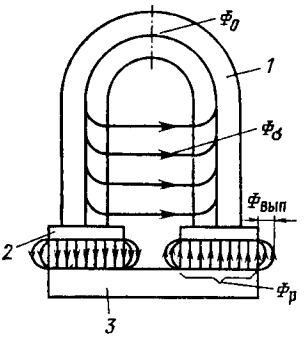


Рис. 5.33. К расчету индукции в рабочем зазоре:

1 — постоянный магнит; *2* — полюсные наконечники; *3* — якорь

Коэффициент рассеяния постоянного магнита

$$\sigma = \Phi_0/\Phi_р = B_0/B_р. \qquad (5.102)$$

Можно принять, что потоки $\Phi_р$, $\Phi_{вып}$, Φ_σ создаются одной и той же разностью магнитных потенциалов, тогда

$$\sigma = \frac{\Lambda_р + \Lambda_{вып} + \Lambda_\sigma}{\Lambda_р}, \qquad (5.103)$$

где $\Lambda_р$, $\Lambda_{вып}$ и Λ_σ — проводимости для соответствующих магнитных потоков. Эти проводимости могут быть найдены по методике, описанной в § 5.1б.

Индукцию в нейтральном сечении найдем, определив $\operatorname{tg}\alpha$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{m_H}{m_B}\,\frac{\Lambda_р \sigma l_м}{S_м} \qquad (5.104)$$

и воспользовавшись кривой размагничивания рис. 5.31.

Индукция в рабочем зазоре

$$B_р = B_0/\sigma. \qquad (5.105)$$

Очень часто намагничивание постоянного магнита производится до его установки в электрический аппарат или, как говорят, без арматуры. Тогда проводимость рабочего зазора уменьшена из-за отсутствия деталей из ферромагнитного материала. Для постоянного магнита, показанного на рис. 5.33, в этом случае отсутствуют полюсные наконечники и якорь. При таком способе намагничивания расчет ведется с использованием прямой возврата.

Если потоки рассеяния значительны, то рекомендуется расчет по участкам, так же как и для электромагнита.

Потоки рассеяния в постоянных магнитах играют значительно бóльшую роль, чем в электромагнитах. Дело в том, что магнитная проницаемость магнитотвердых материалов значительно ниже, чем магнитомягких, из которых изготавливается магнитопровод электромагнитов. Потоки рассеяния вызывают значительное падение магнитного потенциала по длине постоянного магнита и уменьшают МДС, а следовательно, и поток в рабочем зазоре.

Коэффициент рассеяния σ существующих конструкций постоянных магнитов колеблется в довольно широких пределах (2—5) и обычно определяется при их моделировании.

в) **Стабилизация характеристик магнита.** В процессе работы магнита наблюдается уменьшение потока в рабочем зазоре — старение магнита. Различают структурное,

механическое и магнитное старение. При структурном старении материал магнита после закалки или отливки имеет неравномерную структуру, но со временем эта неравномерность переходит в более равновесное — стабильное состояние. При этом в металле исчезают внутренние напряжения. Одновременно уменьшаются значения B_r и H_c.

Механическое старение наступает при ударах и вибрациях магнита.

Магнитное старение — изменение свойств материала под действием внешних магнитных полей. Для стабилизации характеристик постоянного магнита его подвергают термообработке (отпуску), механическим воздействиям (ударам, вибрации) и предварительному размагничиванию полем небольшой напряженности.

Глава шестая

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

а) **Принцип действия**. Магнитный усилитель (МУ) — это электрический аппарат, предназначенный для усиления электрического сигнала по току, напряжению или мощности. В схеме простейшего дроссельного МУ (ДМУ), называемого дросселем насыщения (рис. 6.1), используется управляемое индуктивное сопротивление. Замкнутый магнитопровод изготавливается из материала с резко выраженной нелинейностью кривой намагничивания $B=f(H)$. Рабочая обмотка переменного тока $w_р$ включается в цепь нагрузки $R_н$. В обмотку управления $w_у$ подается управляющий постоянный ток $I_у$. Кривая намагничивания материала магнитопровода дана на рис. 6.2. При прохождении переменного тока по обмотке $w_р$ на обмотке $w_у$ наводится ЭДС. Эта ЭДС будет создавать переменный ток в цепи управления, для ограничения которого включается балластный дроссель $X_б$.

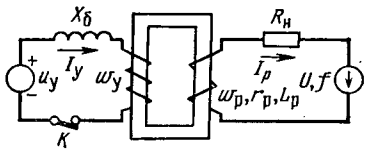


Рис. 6.1. Дроссельный МУ на одном магнитопроводе

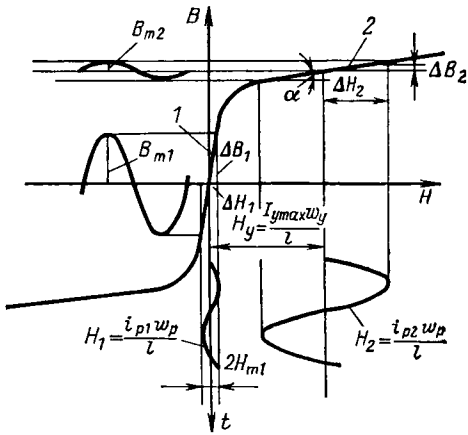


Рис. 6.2. Изменение индукции B, напряженности H и тока i_p при $I_y=0$ и $I_y=I_{ymax}$

При отсутствии тока управления (цепь управления разомкнута) индуктивное сопротивление обмотки w_p

$$X_{p1} = \omega L_{p1} = \omega \frac{w_p \Delta\Phi}{\Delta I} = \omega \mu_{a1} \frac{w_p^2 S}{l},$$

где S — активное сечение магнитопровода; w_p — число витков рабочей обмотки; L_{p1} — ее индуктивность; l — средняя длина магнитной линии в магнитопроводе.

При неизменных S, w_p, l индуктивность L_p определяется абсолютной магнитной проницаемостью μ_a. При $I_y=0$ состояние магнитопровода характеризуется ненасыщенной зоной *1* (рис. 6.2). В этой зоне магнитная проницаемость $\mu_{a1}=\Delta B_1/\Delta H_1$ велика и индуктивное сопротивление обмотки w_p

$$X_{a1} = \omega \mu_{a1} \frac{w_p^2 S}{l}$$

максимально.

Обычно $R_н \ll X_{p1}$, поэтому ток в цепи рабочей обмотки определяется только значением X_{p1} и имеет минимальное значение, равное $I_{н0}=H_1 l/w_p$. Напряженность магнитного поля H_{m1} находится по индукции $B_{m1}=U/(4{,}44\, f w_p S)$.

Подадим в обмотку управления такой постоянный ток управления I_{ymax}, чтобы рабочая зона перешла в область *2*. В этой области насыщения материал имеет магнитную про-

ницаемость $\mu_{a2}=\Delta B_2/\Delta H_2$. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки X_{p2} резко уменьшается. Значения X_{p2} и $R_н$ выбираются так, что $X_{p2}\ll R_н$. Тогда ток в цепи определяется только сопротивлением нагрузки. При этом все напряжение источника питания приложено к сопротивлению нагрузки $R_н$ и активному сопротивлению r_p рабочей обмотки w_p:

$$i_p = \frac{U_m \sin \omega t}{R_н + r_p} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_p}; \quad R_p = R_н + r_p.$$

Мы рассмотрели два крайних режима усилителя — режим холостого хода, когда $I_y=0$ и ток в нагрузке имеет минимальное значение $I_{н0}$, и режим максимального тока нагрузки. При плавном увеличении тока I_y ток нагрузки плавно увеличивается от $I_{н0}$ до максимального значения $I_{нmax}$ за счет уменьшения магнитной проницаемости μ_a. Характеристика управления ДМУ приведена на рис. 6.3. По оси абсцисс отложен ток управления, приведенный к рабочей обмотке $I'_y = I_y w_y / w_p$. Идеальная характеристика управления *1* является прямой, идущей из начала координат под углом 45° к оси I'_y. Реальная характеристика *2* отличается от идеальной наличием тока холостого хода $I_{н0}$ и плавным переходом от линейной части характеристики к току $I_{нmax}$. В линейной зоне характеристики соблюдается равенство средних значений МДС

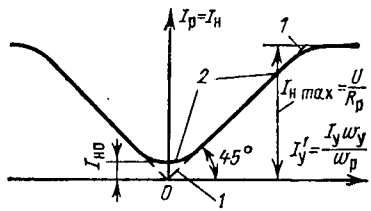


Рис. 6.3. Характеристика управления ДМУ

$$I_p w_p = I_y w_y \text{ или } I_p = I'_y. \qquad (6.1)$$

Равенство (6.1) не зависит от колебаний питающего напряжения, сопротивления нагрузки и частоты источника. Данному значению тока управления всегда соответствует единственное значение тока нагрузки $I_н$. Таким образом, ДМУ является управляемым источником тока.

Вследствие низких значений коэффициента усиления и большой массы ДМУ в настоящее время применяются редко, в основном как измерительные трансформаторы постоянного тока и напряжения. В первом случае роль обмотки управления w_y выполняет шина, по которой проходит измеряемый постоянный ток I_y. Под воздействием магнит-

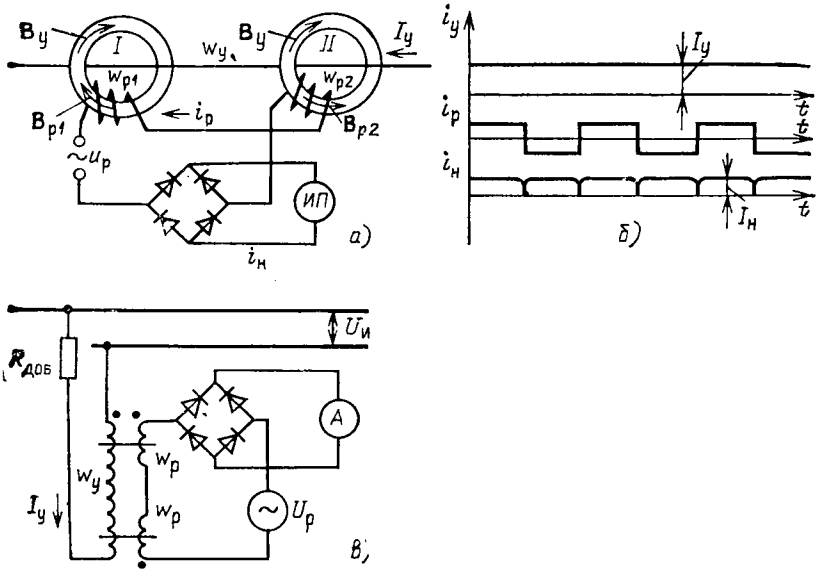


Рис. 6.4. Схема трансформатора постоянного тока (*а*), изменение токов в его обмотках (*б*) и измерительный трансформатор постоянного напряжения (*в*)

ного потока, созданного током I_y, магнитопроводы *I* и *II* насыщаются (рис. 6.4, *а*). Рабочие обмотки $w_{p1}=w_{p2}=w_p$ подключены к источнику переменного напряжения u_p и создают магнитные поля с индукцией $\mathbf{B}_{p1}$ и $\mathbf{B}_{p2}$. В цепь рабочих обмоток через выпрямительный мост включен измерительный прибор ИП, который является нагрузкой усилителя. Допустим, в рассматриваемый полупериод вектор индукции $\mathbf{B}_{p1}$ совпадает по направлению с вектором индукции $\mathbf{B}_y$ управляющего поля обмотки w_y, а вектор индукции $\mathbf{B}_{p2}$ направлен встречно вектору $\mathbf{B}_y$. В результате магнитопровод *I* насыщен и сопротивление обмотки x_{p1} переменному току равно нулю, а магнитопровод *II*, наоборот, далек от насыщения. Материал магнитопроводов *I* и *II* имеет кривую намагничивания, форма которой близка к прямоугольной. Обозначим через B_s значение индукции насыщения материала магнитопровода. В таком материале при суммарном значении магнитной индукции $B \leqslant B_s$ напряженность поля $H=0$ и $\mu_a=\infty$. При $B>B_s$ $\mu_a=0$ и, следовательно, $x_p \to 0$ и не оказывает влияния на полное сопро-

тивление цепи рабочих обмоток. В магнитопроводе *II*, где $B<B_s$, $H=0$, можно записать

$$-i_р w_р + i_у w_у = Hl = 0 \quad \text{или} \quad i_р = i_у w_у/w_р.$$

Из этого равенства следует, что ток $i_р$ в течение рассматриваемого полупериода повторяет форму тока управления $i_у$. Так как $i_у$=const, то и ток $i_р$=const в течение данного полупериода, т. е. принимает прямоугольную форму. В следующий полупериод встречно направлены вектора индукции $\mathbf{B}_{р1}$ и $\mathbf{B}_у$ в магнитопроводе *I*. Ток $i_р$ изменит знак, но сохранит прямоугольную форму. На рис. 6.4, *б* показаны временные зависимости тока управления $I_у$, тока в цепи рабочих обмоток $i_р$ и тока $i_н$, протекающего через измерительный прибор *ИП*. Мгновенные значения токов связаны равенством

$$i_н = i_у \frac{w_у}{w_р},$$

которое выполняется и для средних значений

$$I_н = I_у \frac{w_у}{w_р}.$$

Реальная форма кривой намагничивания материала магнитопроводов отличается от прямоугольной. Поэтому и форма тока $i_р$ не прямоугольна, а в токе $i_н$ появляются глубокие провалы, что вызывает определенную погрешность измерения.

Рассмотренное устройство может быть использовано и в качестве измерительного трансформатора напряжения постоянного тока. Для этого многовитковая обмотка управления $w_у$ подключается к измеряемому напряжению $U_и$ через большое добавочное сопротивление $R_{доб}$ (рис. 6.4, *в*). Ток в обмотке управления $w_у$ пропорционален напряжению: $i_у = U_и/R_{доб}$. Для уменьшения потерь в добавочном сопротивлении ток $i_у$ берется малым — около 10 мА. Измерение этого тока производится так же, как в рассмотренной выше схеме.

6.2. УСИЛИТЕЛЬ С САМОНАСЫЩЕНИЕМ (МУС)

а) **Физические процессы.** Если в цепь рабочей обмотки МУ включить диод, то под действием постоянной составляющей выпрямленного тока происходит подмагничивание магнитопровода. Такие усилители называются *усилителями с самоподмагничиванием* или *с самонасыщением* (МУС).

При рассмотрении такого усилителя (рис. 6.5) примем, что обратное сопротивление диода *VD* равно бесконечности, а прямое учитывается сопротивлением $R_в$. В цепи управления включен балластный дроссель $X_б$ для ограничения переменного тока, создаваемого рабочей обмоткой. Полярность напряжения источника, при которой диод проводит ток, примем за положительную, полупериод, при котором ток проходит через нагрузку, назовем рабочим (РП). Процессы, происходящие в МУС, в основном определяются формой динамической петли гистерезиса материала магнитопровода. Динамической петлей гистерезиса материала называется зависимость $B(H)$ при быстром изменении намагничивающего тока. Вследствие магнитной вязкости и вихревых токов в материале процесс перемагничивания замедляется и ширина динамической петли гистерезиса превышает ширину статической петли. Чем больше dH/dt, тем шире петля гистерезиза. Для материала с высокой степенью прямоугольности кривой намагничивания динамическая петля гистерезиса имеет форму параллелограмма (рис. 6.6, *а*).

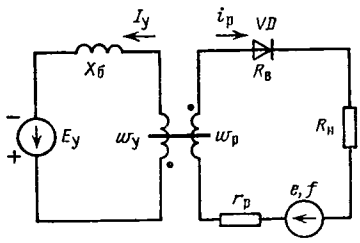


Рис. 6.5. Схема однополупериодного МУС

При отсутствии управляющего поля магнитопровод подмагничивается полем, созданным постоянной составляющей тока рабочей обмотки. Под действием этого поля в магнитопроводе устанавливается остаточная индукция $B_r = B_s$. В рабочем полупериоде рабочая точка, характеризующая состояние магнитопровода, с ростом тока перемещается по участку *1—3*. Так как магнитопровод насыщен, индуктивное сопротивление обмотки $w_р$ равно нулю. Все напряжение источника приложено к активному сопротивлению цепи $r_р + R_н + R_в$. К концу рабочего полупериода состояние магнитопровода вновь возвращается в точку *1*. Таким образом, при отсутствии сигнала управления ток нагрузки в рабочий полупериод

$$i_р = \frac{e}{R_н + R_в + r_р} = \frac{e}{R_р} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_р} = I_{pm} \sin \omega t.$$

В следующий полупериод диод не пропускает ток и со-

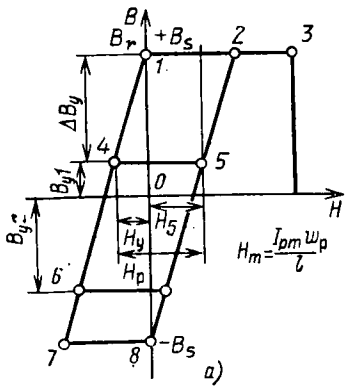
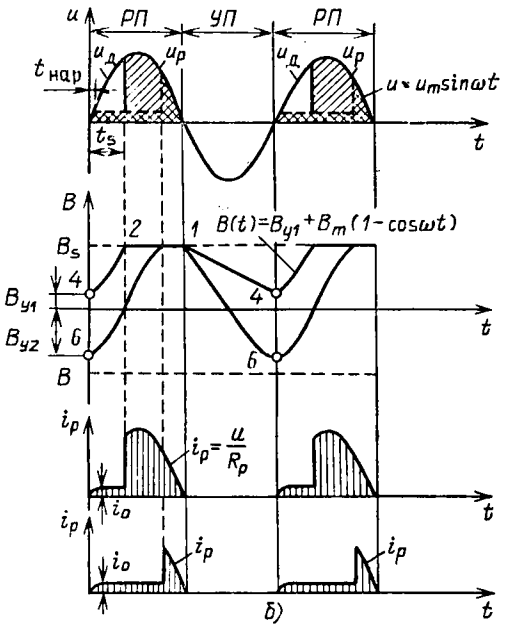


Рис. 6.6. Магнитный усилитель с самонасыщением:

а — динамическая петля гистерезиса; *б* — изменение основных параметров во времени



стояние магнитопровода характеризуется точкой *1* (напряжение источника приложено к вентилю и $i_p=0$).

При наличии $H_y<0$ начальная точка процесса намагничивания спустится в точку *4*. Сделаем допущение, что перемагничивание происходит по частному циклу *4—5—*

—*2—3—1—4*, аналогичному предельному циклу *1—7—8—2*. Положим, что цепь управления питается от источника тока и $I_у = \text{const}$. Цепь рабочей обмотки питается от источника напряжения $e = E_m \sin \omega t$. Тогда для магнитной цепи можно написать

$$-I_у w_у + i_р w_р = Hl, \tag{6.2}$$

где H — напряженность магнитного поля; l — средняя длина магнитопровода; $i_р$ — ток рабочей обмотки. Для рабочей цепи

$$e = E_m \sin \omega t = \frac{d\Psi}{dt} + i_р R_р. \tag{6.3}$$

На участке *4—5* индукция не меняется и $dB = 0$. Соответственно

$$\frac{dB}{dt} \text{ и } \frac{d\Psi}{dt} = w_р S \frac{dB}{dt} = 0.$$

Тогда

$$E_m \sin \omega t = i_р R_р \text{ и } i_р = E_m \sin \omega t / R_р.$$

Ток $i_р$ нарастает по закону синусоиды, пока не достигнет значения

$$i_{р5} = \frac{H_5 l + I_у w_у}{w_р} = \frac{H_5 l + H_у l}{w_р}.$$

Поскольку ширина петли $2H_c$ мала, а амплитуда $I_{рm}$ велика, процесс нарастания тока от 0 до $i_{р5}$ длится очень кратковременно (время нарастания $t_{нар}$, рис. 6.6, *б*). Начиная с точки *5* значение $d\Psi/dt \gg i_р R_р$. Отбросим $i_р R_р$ ввиду малости по сравнению с $d\Psi/dt$. Тогда индукция меняется по закону, определяемому уравнением

$$E_m \sin \omega t = w_р S \frac{dB}{dt}.$$

После интегрирования

$$B = \int_0^t \frac{E_m \sin \omega t}{w_р S} dt + C = -\frac{E_m \cos \omega t}{\omega w_р S} + C = -B_m \cos \omega t + C.$$

При $t = 0 \quad B = B_у; \quad C = B_у + B_m$ и

$$B = B_у + B_m (1 - \cos \omega t). \tag{6.4}$$

По этому закону индукция меняется, пока не достигнет значения B_s (точка 2). Ток намагничивания

$$i_\text{р} = \frac{I_\text{у} w_\text{у} + Hl}{w_\text{р}}.$$

Время насыщения магнитопровода равно t_s. Если считать, что предельная петля прямоугольна, то $i_\text{р} = i_\mu = \text{const} = 2H_c l/w_\text{р}$. После достижения точки $2\ d\Psi/dt = 0$ и ток $i_\text{р}$ меняется по закону

$$i_\text{р} = E_m \sin \omega t / R_\text{р},$$

пока не достигнет нулевого значения. Ради упрощения будем считать, что при прохождении тока $i_\text{р}$ через нуль диод закрывается. Под действием $-H_\text{у}$ происходит размагничивание магнитопровода от индукции $+B_s$ до индукции $B_{\text{у}1}$. Закон изменения индукции во времени $B(t)$ зависит от напряженности поля $H_\text{у}$ [6.1]:

$$\frac{dB}{dt} \approx -cH_\text{у} = -c\frac{I_\text{у} w_\text{у}}{l},\quad B = B_s - c\frac{I_\text{у} w_\text{у}}{l}t,$$

где c — некоторая постоянная.

Поскольку $I_\text{у}$ и $H_\text{у}$ неизменны, то индукция спадает по линейному закону (прямые *1—4* и *1—6*, рис. 6.6, *б*). Полупериод, в котором индукция спадает от $+B_s$ до $B_{\text{у}1}$, называется управляющим (УП).

Чем больше $-H_\text{у}$, тем ниже опускается точка, характеризующая начальное состояние магнитопровода, тем позже наступает его насыщение и меньше ток нагрузки.

В действительности при изменении индукции от $+B_s$ до $B_\text{у}$ в обмотке $w_\text{р}$ создается ЭДС $w_\text{р} S \frac{dB}{dt}$, открывающая диод *VD* и направленная встречно ЭДС источника. При этом ток в нагрузке $i_\text{р}$ проходит через нуль несколько позже, чем $T/2$ (конец полупериода напряжения источника), и начинает протекать раньше, чем время длительности периода T [6.1]. Это оказывает влияние на характеристику управления МУС.

б) **Основные соотношения в усилителе с самонасыщением.** Для любого момента времени в рабочий полупериод можно записать

$$u = i_\text{р} R_\text{р} + w_\text{р} S \frac{dB}{dt}.$$

Умножим правую и левую части на $d(\omega t)$ и возьмем интеграл; тогда

$$\int_0^{\pi} u d(\omega t) = \int_0^{\pi} i_p R_p d(\omega t) + \omega \int_0^{\pi} w_p S \frac{dB}{dt} dt = \int_0^{\pi} i_p R_p d(\omega t) +$$

$$+ \int_{B_y}^{+B_s} \omega w_p S dB. \qquad (6.5)$$

Среднее значение напряжения источника питания за полупериод

$$U = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt = \frac{2}{T} \int_0^{\pi} \frac{1}{\omega} u d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u d(\omega t).$$

Среднее за полупериод значение напряжения на сопротивлении R_p рабочей цепи

$$U_{p\pi} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_p R_p dt = \frac{2}{T\omega} \int_0^{\pi} i_p R_p d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_p R_p d\omega t.$$

Среднее значение напряжения U_p за период

$$U_{p2\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_p R_p d\omega t. \qquad (6.6)$$

Из (6.5) и (6.6) получим

$$\pi U = 2\pi U_{p2\pi} + w_p S\omega [B_s - B_y] = 2\pi U_p + w_p S\omega \Delta B_y, \qquad (6.7)$$

где ΔB_y — изменение индукции за полупериод, равное $B_s - B_y$.

После простых преобразований (6.7) получим

$$U_p = U_{p2\pi} = 0{,}5 (U - 2fw_p S\Delta B_y). \qquad (6.8)$$

U_p называется выходным напряжением усилителя.

При изменении сигнала управления изменяется только ΔB_y. Если $\Delta B_y = 0$, то $B_y = B_s$, весь рабочий полупериод магнитопровод насыщен и

$$U_p = 0{,}5U,$$

т. е. ток через нагрузку проходит в течение всего рабочего полупериода.

Среднее значение наибольшего тока через нагрузку

$$I_н = I_p = U_p/R_p = 0{,}5U/R_p.$$

Режим МУС, при котором через нагрузку протекает наи-

больший ток $I_н$, называется режимом максимальной отдачи. Введем КПД цепи рабочей обмотки

$$\eta = R_н/(R_н + r_р + R_в),$$

тогда напряжение на нагрузке

$$U_н = I_н R_н = 0{,}5UR_н/(R_н + r_р + R_в) = 0{,}5\eta U;$$

на линейном участке характеристики управления $U_н = f(I_у)$ имеем

$$U_н = 0{,}5\eta\,(U - 2fw_р S\Delta B_у). \qquad (6.9)$$

В следующий, управляющий полупериод $I_н = 0$, если пренебречь обратным током диода.

Другой крайний случай имеет место, когда $\Delta B_у = 2B_m$:

$$U_р = 0{,}5\,(U - 2fw_р S \cdot 2B_m). \qquad (6.10)$$

В этом случае $U_р = 0$, так как амплитудное значение индукции B_m, создаваемой полем рабочей обмотки, связано с напряжением питания уравнением

$$U = 4fw_р SB_m.$$

Обычно $B_m = B_s$. Если $\Delta B_у = B_s - B_у = 2B_m$, то в течение всего полупериода не наступает насыщения магнитопровода (петля *1—7—8—2*, рис. 6.6, *а*).

В реальном МУС в этом режиме напряжение $U_р = I_{н0}R_р \neq 0$, так как в рабочей цепи протекает небольшой намагничивающий ток $I_{н0}$.

Для построения характеристики управления усилителя $U_н = f(I_у)$ необходимо знать зависимость $\Delta B_у = f(I_у)$, называемую динамической кривой размагничивания. Эту зависимость получают экспериментально с помощью схемы на рис. 6.7. Обмотка управления $w_у$ питается от источника тока постоянного напряжения, рабочая обмотка $w_р$ — от источника тока переменного напряжения, обмотка $w_{изм}$ является измерительной. Частота f источника переменного тока равна частоте, при которой будет работать МУС. Ток $i_р$ выбирается так, чтобы обеспечить насыщение материала

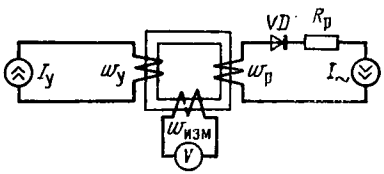


Рис. 6.7. Схема для снятия динамической кривой размагничивания

магнитопровода при любом значении H_y. Среднее значение напряжения измерительной обмотки

$$U_и = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} w_{изм} S \frac{dB}{dt}\, dt = \frac{1}{T/2}\int_{B_y}^{B_s} w_{изм}\, SdB = 2f w_{изм}\, S\Delta B_y,$$

откуда получим

$$\Delta B_y = U_и / 2f w_{изм}\, S,$$

где ΔB_y — изменение индукции в магнитопроводе.

Прибор V измеряет среднее значение одной (положительной) волны напряжения.

Изменяя ток управления I_y и соответственно H_y, получают различные значения ΔB_y.

На рис. 6.8, *а* представлена линеаризованная динамическая кривая размагничивания $\Delta B_y = f(H_y)$. По этой кривой с помощью (6.10) на рис. 6.8, *б* построена характеристика управления $U_н = f(I_y)$. Там же показаны мгновенное напряжение на нагрузке $u_н$ и частные циклы намагничивания для характерных точек *1—3* кривой $\Delta B_y = f(H_y)$.

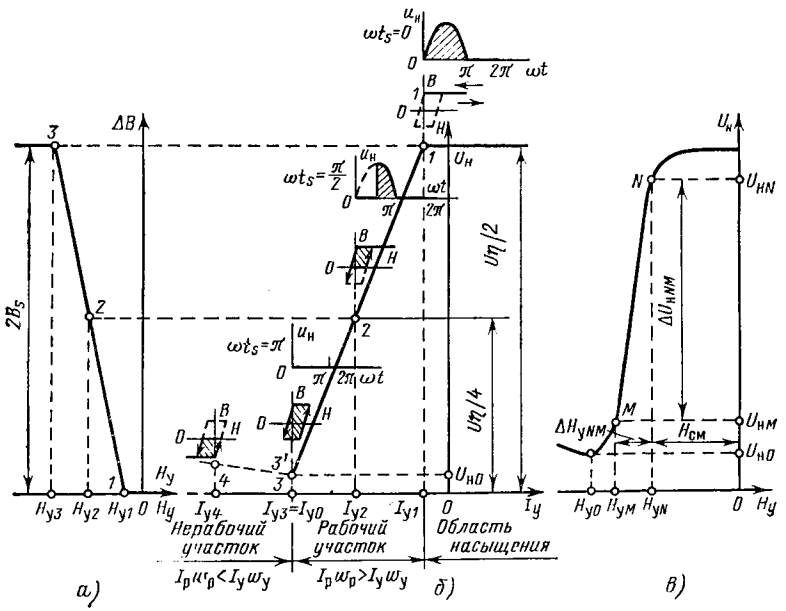


Рис. 6.8. Динамическая кривая размагничивания (*а*) и характеристики управления МУС (*б* и *в*)

При токе управления I_{y1}, т. е. $H_y = H_{y1}$, имеет место режим максимальной отдачи.

Если $B_m = B_s$ и $H_y = H_{y3}$, то согласно (6.10) напряжение $U_н = 0$. В действительности через нагрузку протекает намагничивающий ток холостого хода $I_{н0}$, определяемый петлей гистерезиса и равный $I_{н0} = 2H_c l_c/(2w_p)$.

Напряжение на нагрузке (точка $3'$)

$$U_{н0} = I_{н0} R_н.$$

Режим при $I_y = I_{y3}$ называется режимом холостого хода. При $I_y < 0$ и $|I_{y4}| > |I_{y3}|$ усилитель работает в режиме, близком к режиму ДМУ (точка *4*, рис. 6.8, *б*). Обычно эта область для работы не используется. Реальная динамическая кривая размагничивания отличается от показанной на рис. 6.8, *а*. Поэтому на практике характеристика управления имеет вид, показанный на рис. 6.8, *в*. На этом рисунке линейный участок MN — рабочая зона МУС; $\Delta U_{нNM}$ — изменение напряжения на нагрузке; ΔH_{yNM} — напряженность магнитного поля управления, необходимая для изменения напряжения на нагрузке на величину $\Delta U_{нNM}$.

6.3. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ СХЕМЫ МУС

Однополупериодная схема (рис. 6.5) практически не применяется из-за следующих недостатков:

1. Для ограничения наведенных в обмотке управления токов необходим балластный дроссель, наличие которого ухудшает выходные параметры МУС.

2. Прохождение рабочего тока лишь в течение одного полупериода уменьшает мощность нагрузки.

3. Схема пригодна для питания нагрузки только выпрямленным током.

На рис. 6.9 изображены двухполупериодные мостовые схемы усилителя с нагрузкой на постоянном и переменном токе. При полярности вторичной обмотки питающего трансформатора, обозначенной на рис. 6.9, *а*, в верхнем усилителе МУС *I* имеет место рабочий полупериод, а в нижнем МУС *II* — полупериод управления. В следующем полупериоде МУС *II* будет находиться в рабочем полупериоде, а МУС *I* — в полупериоде управления.

При большом сопротивлении в цепи управления переменная составляющая напряжения, наведенная на обмотках w_y обмотками w_p, создает малый переменный ток, которым можно пренебречь. Тогда по цепи управления

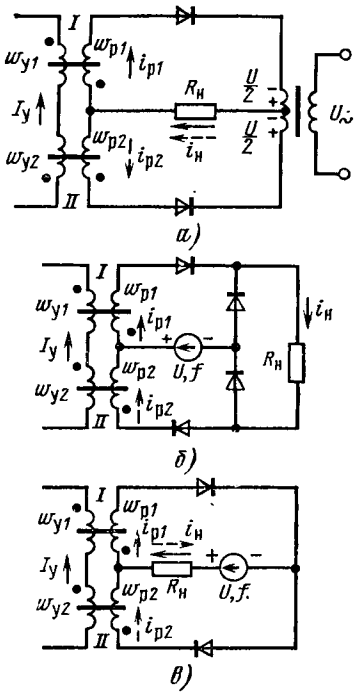


Рис. 6.9. Схемы двухполупериодного МУС:

а и *б* — на постоянном токе; *в* — на переменном токе

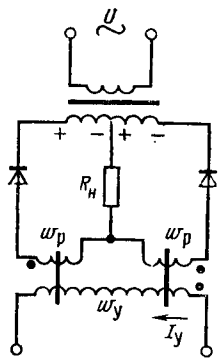


Рис. 6.10. МУС с общей обмоткой управления

протекает только ток $I_у$. Такой режим работы МУС называется режимом вынужденного намагничивания. В этом случае условия работы каждого МУС аналогичны рассмотренным в § 6.2.

Обычно сопротивление цепи управления мало и для компенсации наводимых на обмотках $w_у$ ЭДС начала и концы обмоток должны соединяться так, как показано на рис. 6.9. Две обмотки управления могут быть заменены одной. При этом для схемы 6.9, *а* необходимо изменить направление включения рабочих обмоток $w_р$ (рис. 6.10), а для схем рис. 6.9, *б* и *в* направление их включения сохраняется.

Процесс изменения электрических величин в схеме рис. 6.9, *а* и *б* представлен на рис. 6.11, *б*—*г*. Примем начальное значение индукции $B_у = 0$. МУС *I* находится в рабочем полупериоде, и через нагрузку протекает ток $i_{р1}$. В это время индукция B_1 в магнитопроводе МУС *I* нарастает от значения $B_у = 0$ до $+B_s$. МУС *II* находится в управляющем

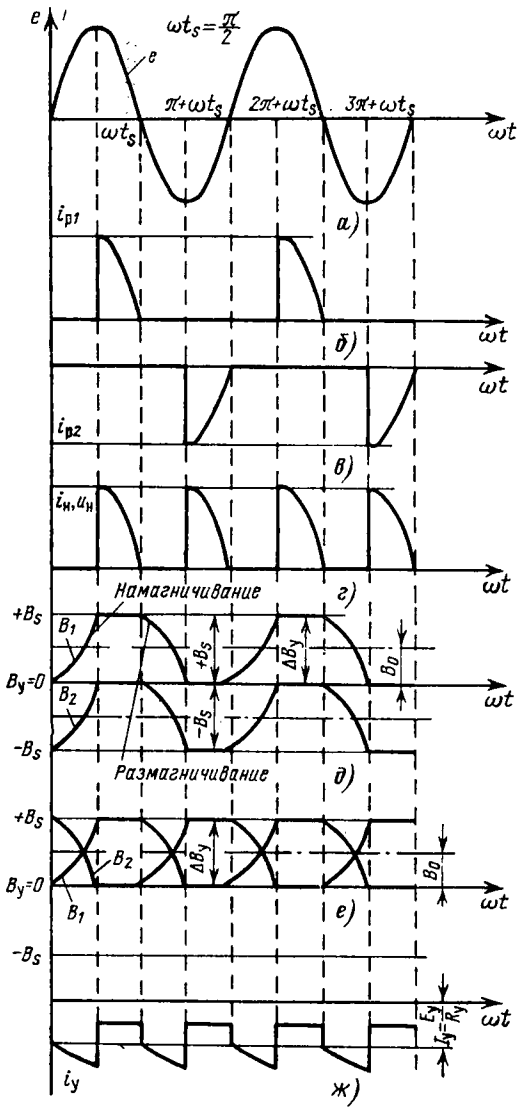


Рис. 6.11. Изменение во времени основных электрических и магнитных параметров двухполупериодного МУС

полупериоде, и индукция меняется от значения $-B_s$ до $B_y=0$. Во втором полупериоде МУС *II* находится в рабочем полупериоде, а МУС *I* в управляющем. Соответственно индукция в МУС *II* нарастает от $B_y=0$ до $B_y=-B_s$, а в МУС *I* происходит размагничивание и индукция меняется от $+B_s$ до $B_y=0$. Среднее значение индукции в магнитопроводе равно B_0. В МУС по схеме рис. 6.9, *б* обмотки управления w_y включены согласно, поэтому в первом полупериоде индукция B_2 меняется от значения $+B_s$ до $B_y=0$. Ток и напряжение на нагрузке меняются по кривым рис. 6.11, *г*. Ток через нагрузку протекает оба полупериода, поэтому среднее значение напряжения удваивается по сравнению со схемой рис. 6.4:

$$U_н = \eta\,(U - 2fw_p\,S\Delta B_y). \qquad (6.11)$$

Реальная характеристика управления МУС является нелинейной (рис. 6.8, *в*). Для более эффективного использования линейной части *MN* характеристики применяется обмотка смещения со своим источником питания (рис. 6.12). В этом случае поле управления создается обмоткой управления w_y и обмоткой смещения $w_{см}$ (рис. 6.12, *а*):

$$H_y = I_y w_y/l + I_{см} w_{см}/l.$$

Допустим, с ростом положительного тока управления напряжение на нагрузке должно возрастать и МУС должен работать на линейном участке *MN* характеристики управления. Тогда обмотка смещения должна создавать отрицательное поле смещения $H_{см}=I_{см}w_{см}/l<0$, для чего по ней должен проходить ток $I_{см}<0$. Это смещение перемещает ось ординат так, что она проходит через точку *M* (рис. 6.12, *б*). Приведенный к обмотке управления ток смещения

$$I'_{см} = I_{см}\,w_{см}/w_y.$$

При подаче положительного тока управления I_y МУС работает на линейной части характеристики *MN*.

Следует отметить, что МУС может иметь большое число *n* управляющих обмоток. Результирующее поле управления равно алгебраической сумме МДС, создаваемых этими обмотками:

$$H_y = H_{y1} + H_{y2} + \ldots + H_{yn} = \sum_{i=1}^{n} H_{yi} = \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{yi}\,w_{yi}}{l}.$$

Таким образом, МУС может быть использован как сумматор многих независимых переменных величин.

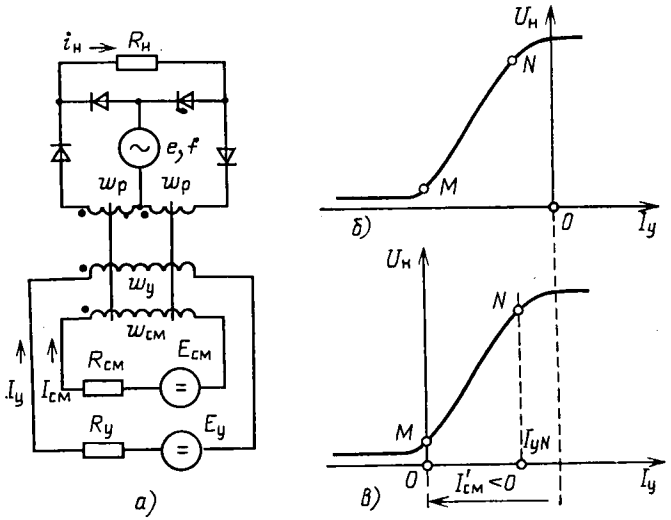


Рис. 6.12. МУС с обмоткой смещения и его характеристики управления

Рассмотрим работу МУС с двумя обмотками управления (рис. 6.9, *а*) при конечном значении сопротивления цепи управления $R_у$. Пусть $B_у=0$. В рабочий полупериод МУС *I* индукция в нем меняется от 0 до $+B_s$. При этом в его обмотке управления наводится ЭДС $e_{у1}=-w_{у1}S\frac{dB_1}{dt}$. В это время МУС *II* находится в полупериоде управления и его магнитопровод размагничивается не только под действием ЭДС управления $E_у<0$, но и под действием ЭДС $e_{у1}$. Обычно $E_у \ll e_{у1}$. Если положить, что сопротивление $R_у=0$, то $I_у R_у=0$; ЭДС $e_{у1}$ приложена к МУС *II*, и до момента насыщения МУС *I* размагничивание МУС *II* производится только за счет ЭДС $e_{у1}$, так как напряжением управления $E_у$ можно пренебречь. При этом $-e_{у1}=$

$$=w_{у1}S\frac{dB_1}{dt}=w_{у2}S\frac{dB_2}{dt}=\frac{w_{у1}}{w_р}U_m\sin\omega t.$$

Тогда

$$B_1=B_m(1-\cos\omega t)+B_{у1};\quad B_2=B_m(1-\cos\omega t)+(-B_s).$$

Таким образом, индукции B_1 и B_2 отличаются только постоянными составляющими. При $\omega t=\omega t_s$

$$\cos\omega t_s=1-\Delta B_у/B_m;\quad B_1=+B_s;\quad B_2=B_{у2}=0.$$

В действительности из-за того, что $R_y \neq 0$, индукция B_2 к моменту $t=t_s$ не принимает значения B_{y2}. После насыщения МУС *I* ($t>t_s$) $e_{y1}=0$. За счет действия E_y индукция B_2 достигает значения $B_{y2}=0$. Следует сказать, что при $0<t\leqslant t_s$ размагничивание МУС *II* происходит под действием большой ЭДС e_{y1} по динамической (широкой) петле гистерезиса, так как $|dB_2/dt|$ велико. В интервале $t_s \leqslant t \leqslant \pi/\omega$ размагничивание идет под действием малой ЭДС E_y по петле, близкой к статической. В следующий полупериод ЭДС e_{y2}, наводимая МУС *II*, участвует в процессе размагничивания МУС *I*.

На рис. 6.11, *д* представлено изменение индукции в дросселях при условии, что $R_y=0$ для схемы рис. 6.9, *а*. Поскольку переменные ЭДС в обмотках управления e_{y1} и e_{y2}, появляющиеся на них в рабочие полупериоды, прикладываются к обмоткам управления соседних МУС, которые подвергаются размагничиванию, то в цепи управления течет относительно небольшой переменный ток (рис. 6.11, *ж*) и нет необходимости включать в цепь управления балластный дроссель $X_б$.

Процесс в цепи управления повторяется каждый полупериод частоты источника, и ток управления имеет постоянную составляющую $I_y=E_y/R_y$ и четные гармоники (рис. 6.11, *ж*).

Чем меньше сопротивление R_y по сравнению с $X_{д.у}$ — сопротивлением обмотки w_y дросселя, находящегося в режиме управления, тем большая часть наведенной ЭДС e_{y1} прикладывается к обмотке w_y МУС *II* и тем больше один дроссель влияет на другой.

Изменение индукции в МУС по схемам рис. 6.9, *б* и *в* показано на рис. 6.11, *е*.

Различают статическую и динамическую характеристики управления МУС. Первая дает зависимость $U_н=f(I_y)$ при медленном изменении тока управления I_y, вторая — при скачкообразном. Описанная выше связь дросселей через обмотки управления при малом R_y изменяет статическую характеристику МУС (рис. 6.14, *в*) и создает замедление его работы в переходных режимах (рис. 6.13). МУС по схемам 6.9, *а* и *б* может работать на нагрузку, имеющую активно-индуктивный характер. При большой постоянной времени нагрузки $L_н/R_н$ через нее течет выпрямленный ток без пульсаций [6.1].

Статические параметры

а) **Крутизна характеристики управления.** Для МУС характерна зависимость выходного напряжения $U_р$ только от $\Delta B_у$:

$$U_р = U - 2f w_р S \Delta B_у. \tag{6.12}$$

Напряжение на нагрузке

$$U_н = \eta U_р = \eta (U - 2f w_р S \Delta B_у).$$

Изменение индукции $\Delta B_у$ определяется током управления $I_у$. Как видно из (6.12), выходное напряжение $U_р$ не зависит от сопротивления рабочей цепи, и при данном токе управления МУС является управляемым источником напряжения. Если $R_н \gg R_в + r_р$, то $U_н$ мало зависит от сопротивления нагрузки (§ 6.5).

Характеристикой управления МУС называется зависимость выходного напряжения от тока управления $U_р(I_у)$ или напряжения на нагрузке от тока управления $U_н(I_у)$.

Крутизна характеристики управления

$$k_R = \frac{\partial U_н}{\partial I_у} = \frac{\Delta U_н}{\Delta I_у}.$$

Подставляя в это выражение значение $U_п$ из (6.11), получаем

$$k_R = \frac{\partial \eta (U - 2f w_р S \Delta B_у)}{\partial I_у} = -2f \eta w_р S \frac{\partial \Delta B_у}{\partial I_у}.$$

Но

$$I_у = H_у l / w_у.$$

Следовательно,

$$k_R = -2f \eta w_р w_у \frac{S}{l} \frac{\partial (\Delta B_у)}{\partial H_у}. \tag{6.13}$$

Производная $\partial \Delta B_у / \partial H_у$ характеризует наклон кривой размагничивания магнитопровода МУС и условно может определяться эквивалентной магнитной проницаемостью размагничивания $\mu_р = -\partial \Delta B_у / \partial H_у$. Введем понятие индуктивного сопротивления размагничивания:

$$X_р = \omega L_р = \omega \frac{w_р^2 S}{l} \mu_р. \tag{6.14}$$

Тогда из (6.13) и (6.14) имеем

$$k_R = \frac{1}{\pi}\eta X_{\text{р}}\frac{w_{\text{у}}}{w_{\text{р}}}. \qquad (6.15)$$

Таким образом, $k_R \sim X_{\text{р}} w_{\text{у}}/w_{\text{р}}$.

б) **Коэффициент усиления МУС.** Коэффициент усиления по току

$$k_I = \frac{\Delta I_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{у}}} = \frac{\Delta I_{\text{н}} R_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{у}} R_{\text{н}}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{у}} R_{\text{н}}} = \frac{k_R}{R_{\text{н}}} =$$

$$= \frac{1}{\pi}\eta\frac{X_{\text{р}}}{R_{\text{н}}}\frac{w_{\text{у}}}{w_{\text{р}}} = \frac{1}{\pi}\frac{X_{\text{р}}}{R_{\text{р}}}\frac{w_{\text{у}}}{w_{\text{р}}}. \qquad (6.16)$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{у}}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{у}} R_{\text{у}}} = \frac{k_R}{R_{\text{у}}}. \qquad (6.17)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$k_P = k_I k_U = \frac{k_R^2}{R_{\text{у}} R_{\text{н}}}. \qquad (6.18)$$

Динамические параметры

в) **Запаздывание.** Под запаздыванием понимается выдержка времени между моментом скачкообразного изменения тока управления до момента появления тока нагрузки, соответствующего этому новому значению $I_{\text{у}}$ в установившемся режиме. Простейший однополупериодный МУС с большим сопротивлением цепи управления $R_{\text{у}}$ имеет малую постоянную времени, так как последняя обратно пропорциональна $R_{\text{у}}$. Однако, даже если постоянная времени очень мала, МУС имеет запаздывание. На рис. 6.13, *а* и *б* показано изменение напряжения на нагрузке при подаче управляющего сигнала в начале рабочего РП и управляющего УП полупериодов.

Пусть напряжению управления $U_{\text{у1}}$ соответствуют индукция $B_{\text{у1}}$ управляющего поля и напряжение $U_{\text{н1}}$ на нагрузке (рис. 6.13, *а*). Насыщение магнитопровода происходит в момент t_{s1}. При уменьшении отрицательного напряжения управления до значения $U_{\text{у2}}$ на нагрузке должно установиться напряжение $U_{\text{н2}}$. Насыщение магнитопровода происходит в момент t_{s2}. Значение напряжения на нагрузке определяется значением $B_{\text{у}}$ в начале второго РП (§ 6.2) В течение РП МУС неуправляем. Поэтому если напряжение управления изменилось до значения $U_{\text{у2}}$ в начале РП (рис. 6.13, *а*), то соответствующее ему значение $B_{\text{у2}}$ установится только во втором полупериоде. В третьем полупериоде установится новое напряжение на нагрузке $U_{\text{н2}}$, соответствующее $U_{\text{у2}}$.

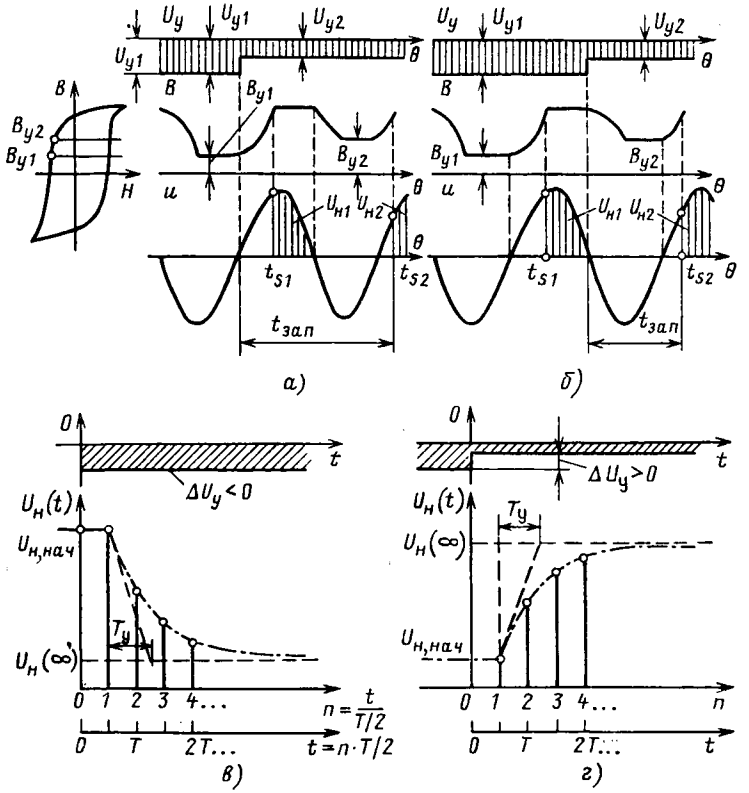


Рис. 6.13. Эффект запаздывания в МУС:

а — напряжение управления изменилось в начале РП; *б* — напряжение управления изменилось в начале УП; *в*, *г* — изменение среднего значения напряжения на нагрузке МУС при подаче отрицательного (*в*) и положительного (*г*) сигналов управления

Если напряжение U_{y2} появится в начале УП (рис. 6.13, *б*), то новое значение напряжения $U_{н2}$ на нагрузке установится во втором полупериоде. Таким образом, даже в идеальном случае, когда $R_y = \infty$, МУС имеет запаздывание, которое может достигать 1—1,5 периода частоты питания. В двухполупериодном МУС запаздывание уменьшается до 0,5—1 периода. Такие усилители называются быстродействующими. Повышая частоту питания до 500—1000 Гц, можно получить очень малую инерционность усилителя.

г) **Постоянная времени, добротность.** Если сопротивление R_y цепи управления велико, то мощность управления

$P_у = I_у^2 R_у$ увеличивается и k_P падает. Для повышения k_P и k_u сопротивление $R_у$ необходимо уменьшать. При малом $R_у$ процесс перехода от одного стационарного режима к другому резко замедляется. Зависимость (6.12) сохраняется и для переходного режима МУС, но ток управления $i_у$, определяющий напряженность поля $H_у$, а следовательно, и значение $\Delta B_у$, нарастает медленно. Скорость нарастания $i_у$ определяется индуктивностью цепи управления $L_у$. Для цепи управления можно написать

$$L_у \frac{di_у}{dt} + i_у R_у = U_у \text{ или } T_у \frac{di_у}{dt} + i_у = \frac{U_у}{R_у}, \quad (6.19)$$

где $T_у = L_у/R_у$.

Решение этого уравнения представляет собой экспоненту. При подаче на вход напряжения $\Delta U_у$ ток управления меняется по закону

$$i_у = \frac{\Delta U_у}{R_у}\left(1 - e^{-t/T_у}\right).$$

Переходный процесс в МУС с учетом запаздывания показан на рис. 6.13, *в*. До появления напряжения управления $\Delta U_у$ в нагрузке протекал максимальный ток при напряжении $U_н = U_{н,нач}$. После подачи $\Delta U_у < 0$ отрицательный ток управления нарастает по экспоненте. При этом увеличивается $\Delta B_у$, а $U_н$ падает по экспоненте с запаздыванием в один полупериод. На рис. 6.13, *г* показано изменение напряжения на нагрузке при уменьшении отрицательного напряжения управления ($\Delta U_у > 0$). Постоянная времени $T_у$ определяется крутизной k_R статической характеристики управления $U_н = f(I_у)$ и связана с параметрами МУС уравнением [2.3]

$$T_у = \frac{1}{2f}\frac{w_у}{w_р}\frac{1}{\eta}k_U = \frac{1}{2f}\frac{w_у}{w_р}\frac{1}{\eta R_у}k_R. \quad (6.20)$$

С ростом коэффициентов усиления увеличивается k_R, а следовательно, и постоянная времени $T_у$.

Для оценки быстродействия МУС вводится понятие добротности $D = k_P/T_у$.

Чем больше добротность D, тем меньше постоянная времени $T_у$ и тем выше быстродействие МУС. Воспользовавшись (6.20), получим

$$D = 2f\eta\frac{w_р}{w_у}\frac{k_R}{R_н} = 2f\eta\frac{w_р}{w_у}\frac{R_у}{R_н}k_U.$$

В переходном режиме МУС можно представить инерционным звеном первого порядка, аналогичного цепи R, L, включенной на источник напряжения. Задача переходного режима решается в операторной форме

$$\Delta U_{\text{н}}(p) = k_U e^{-T/(2p)} \frac{\Delta U_{\text{у}}(p)}{T_{\text{у}} p + 1},$$

где $\Delta U_{\text{н}}(p)$ — приращение напряжения на нагрузке в операторной форме; $\Delta U_{\text{у}}(p)$ — соответствующее ему приращение напряжения на входе; $T/2$ — время запаздывания, которое можно принять равным $1/(2f)$.

6.5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РАБОТУ МУС

а) **Свойства магнитного материала.** На характеристику управления МУС большое влияние оказывают магнитные свойства материала магнитопровода. Для оценки свойств магнитного материала используется понятие коэффициента прямоугольности кривой намагничивания $k_{\text{п}} = B_r/B_s$. Чем больше $k_{\text{п}}$, тем круче характеристика управления и больше ее линейная часть (рис. 6.14, *а*). При максимальном использовании магнитного материала рабочая точка на характеристике управления рис. 6.8, *в* занимает положение N. При этом напряжение на нагрузке согласно (6.12)

$$U_{\text{ном}N} = \eta \left(U - 2f\omega_{\text{р}} S \Delta B_{\text{у,ном}}\right),$$

где $\Delta B_{\text{у,ном}}$ — перепад индукции, соответствующий концу линейного участка MN. Из (6.12) можно получить

$$U_{\text{ном}N} = \eta U \left(1 - \frac{\Delta B_{\text{у,ном}}}{2B_m}\right) = \beta\eta U,$$

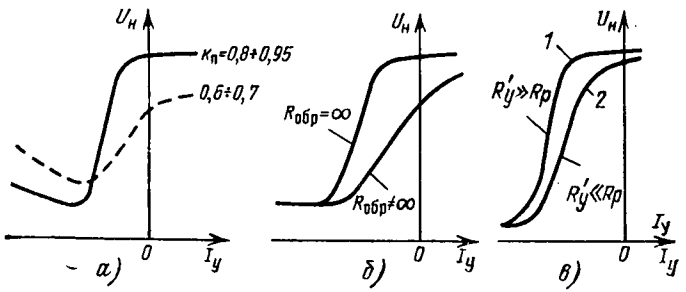


Рис. 6.14. Влияние различных факторов на характеристики МУС: *а* — влияние коэффициента прямоугольности $k_{\text{п}}$; *б* — влияние обратного сопротивления диода $R_{\text{обр}}$; в — влияние сопротивления цепи управления $R'_{\text{у}}$

где

$$\beta = 1 - \frac{\Delta B_{\text{у,ном}}}{2B_m}.$$

Коэффициент β характеризует часть переменного напряжения, которая ложится на МУС в режиме максимальной отдачи. С ростом $k_{\text{п}}$ коэффициент $\Delta B_{\text{у,ном}}/(2B_m)$ уменьшается, а β увеличивается, что ведет к возрастанию напряжения и мощности нагрузки.

б) **Свойства вентилей.** Прямое сопротивление вентилей входит в общее сопротивление рабочей цепи. С увеличением прямого сопротивления уменьшается КПД η рабочей цепи усилителя.

На характеристику МУС существенно влияет обратное сопротивление вентилей $R_{\text{обр}}$ (рис. 6.14, *б*). Если $R_{\text{обр}} \neq \infty$, то в управляющий полупериод через рабочую обмотку проходит обратный ток, размагничивающий магнитопровод (увеличивается $\Delta B_{\text{у}}$), при этом напряжение на нагрузке и ток в ней уменьшаются.

Напряженность магнитного поля от обратного тока

$$H_{\text{обр}} = I_{\text{обр}} w_{\text{р}}/l.$$

Для того чтобы обратный ток не сказывался на работе усилителя, необходимо соблюдение неравенства

$$H_{\text{обр}} \ll \Delta H_{\text{у}}, \tag{6.21}$$

где $\Delta H_{\text{у}}$ — напряженность поля управления, которая обеспечивает изменение тока $I_{\text{н}}$ от I_{min} до I_{max}.

Чем лучше магнитный материал, тем меньше $\Delta H_{\text{у}}$ требуется для управления усилителем, тем меньше значение допустимого обратного тока.

в) **Напряжение питания.** Согласно (6.11) напряжение на нагрузке

$$U_{\text{н}} = \eta\,(U - 2f w_{\text{р}} S \Delta B_{\text{у}}).$$

При неизменном токе управления изменение индукции $\Delta B_{\text{у}} = \text{const}$. Напряжение $U_{\text{н}}$ прямо пропорционально питающему напряжению U. Крутизна и протяженность линейной части характеристики управления практически не зависят от питающего напряжения. Если напряжение питания $U > 4f w_{\text{р}} S B_s$, то напряжение холостого хода $U_{\text{н0}}$ растет пропорционально напряжению сети.

г) **Сопротивление нагрузки.** Можно записать (6.11) в виде

$$U_{\text{н}} = \frac{1}{1 + (R_{\text{в}} + r_{\text{р}})/R_{\text{н}}}\,(U - 2f w_{\text{р}} S \Delta B_{\text{у}}). \tag{6.22}$$

Обычно $R_н \gg r_р + R_в$, и напряжение на нагрузке при этом условии мало зависит от сопротивления $R_н$. Ток нагрузки $I_н = U_н/R_н$ меняется обратно пропорционально $R_н$. Таким образом, МУС является управляемым источником напряжения.

д) **Сопротивление цепи управления.** На рис. 6.14,*в* представлены характеристики управления МУС при большом сопротивлении цепи управления $R'_у = R_у w_р^2/w_у^2 \gg R_р$ и при малом $R'_у \ll R_р$. В первом случае уменьшается взаимное влияние дросселей и процесс перемагничивания идет под действием $I_у = \text{const}$. Характеристика сдвигается влево и имеет достаточную крутизну (кривая *1*). Во втором — характеристика сдвигается вправо в положение *2* и имеет меньшую крутизну [6.1].

6.6. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ (БМУ)

а) **Двухобмоточные БМУ.** Для того чтобы двухполупериодный МУС имел высокие k_I, k_U и k_P и был быстродействующим, необходимо, чтобы рабочие полупериоды одного магнитопровода не влияли на управляющие полупериоды другого. Рассмотрим сначала работу однополупериодного МУС, в цепь управления которого включены диод *VD1* и ис-

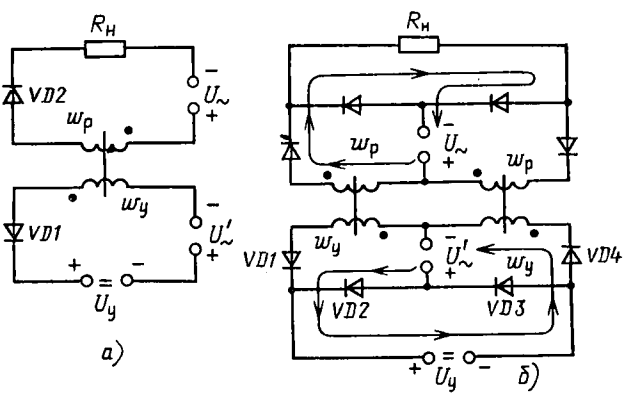


Рис. 6.15. Быстродействующий магнитный усилитель с малым сопротивлением цепи управления

точник опорного переменного напряжения $U'_\sim$ (рис. 6.15, *а*). Для того чтобы *VD1* не открывался за счет ЭДС $e_{у\sim}$, наведенной потоком рабочей обмотки, необходимо условие

$$U_\sim / U'_\sim = w_р / w_у.$$

Пусть в рабочей цепи имеет место РП и по ней протекает ток. При показанной на рисунке полярности напряжений $U'_{\sim}$ и $U_у$ вентиль *VD1* заперт и цепь управления оказывается разомкнутой. ЭДС, возникающая на обмотке управления $w_у$ под действием напряжения $U_{\sim}$, не создает в цепи управления тока, так как *VD1* заперт. Не проходит ток и от источника сигнала $U_у$. В следующий, управляющий полупериод диод *VD2* запирается и ток по рабочей цепи не проходит. В связи с изменением полярности $U'_{\sim}$ диод *VD1* открывается и процесс размагничивания магнитопровода определяется разностью напряжений $U_у$ и $U'_{\sim}$. При $U_у = 0$ размагничивание магнитопровода происходит только за счет опорного напряжения $U'_{\sim}$, которое выбирается так, чтобы к концу УП индукция достигла значения $-B_s$. При наличии сигнала $U_у$ в цепи действует разность напряжений $U_у$ и $U'_{\sim}$. В результате к концу УП индукция в магнитопроводе не достигнет значения $-B_s$. По мере увеличения $U_у$ изменение индукции в УП будет уменьшаться. Если сигнал $U_у$ создает индукцию $+2B_s$, то изменение индукции в течение УП равно нулю. К концу УП индукция будет такая же, как и к его началу, т. е. будет равна $+B_s$. В этом случае при следующем РП по нагрузке будет проходить максимальный рабочий ток.

В описанной схеме устранено влияние рабочей цепи на цепь управления. Диод *VD1* играет роль коммутирующего устройства в цепи управления. В течение РП сопротивление *VD1* бесконечно велико, цепь управления разомкнута и рабочая цепь на нее не влияет. В течение УП сопротивление *VD1* равно нулю и процесс размагничивания определяется только цепью управления. Таким образом, и при конечном сопротивлении цепи управления обеспечивается быстродействие МУС по схеме рис. 6.15, *а*.

На этом принципе построена двухполупериодная схема МУС по рис. 6.15, *б*, рабочая цепь которой соответствует схеме рис. 6.9, *б*. В цепь управления введены диоды *VD1—VD4* и опорное напряжение $U'_{\sim}$. При принятой полярности питания рабочей цепи в МУС *I* будет РП, а в МУС *II—УП*. Направление рабочего тока $i_р$ указано стрелкой. Диод *VD1* заперт, цепь этой обмотки управления разорвана и, ЭДС, возникающая в ней под действием рабочей обмотки, не оказывает влияния на цепь управления. Диоды *VD2* и *VD4* открыты, и процесс размагничивания МУС *II* происходит под действием опорного напряжения $U''_{\sim}$ и напряжения $U_у$. Обычно опорное напряжение получается с помощью специального трансформатора, подключенного к источнику питания рабочей цепи.

Схемы БМУ весьма разнообразны, но в основе большинства из них лежит устранение взаимного влияния обмоток управления и рабочих.

б) Однообмоточные БМУ. В регулирующих электрических аппаратах часто используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Существо метода заключается в том,

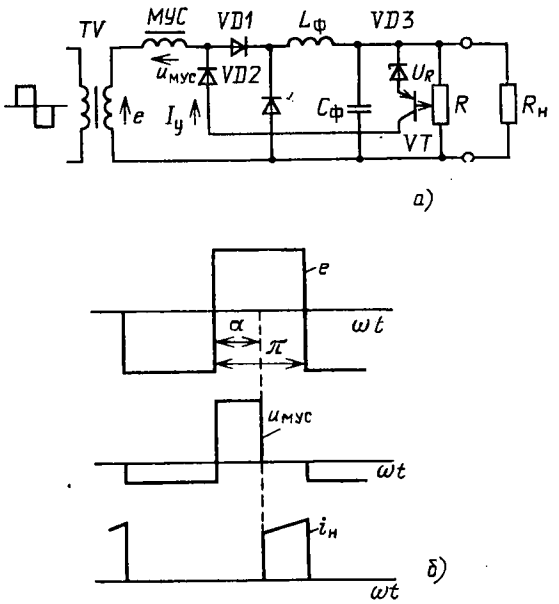


Рис. 6.16. Стабилизатор напряжения на базе МК:
а — упрощенная схема; *б* — изменение основных параметров во времени

что ток через нагрузку протекает импульсами и его значение определяется отношением времени протекания тока $t_р$ и временем цикла $t_ц = t_р + t_п$ ($t_п$ — время паузы тока):

$$I_н = I_{ср} t_р/(t_р + t_п),$$

где $I_{ср}$ — среднее значение тока при $t_р = t_ц$. В качестве коммутирующего элемента могут использоваться электронные коммутаторы (ЭК) (транзисторы, тиристоры в режиме ключа) и МУС, работающие в режиме ключа. Когда МУС насыщен, сопротивление рабочей обмотки приближается к нулю (ключ замкнут). Когда МУС ненасыщен, его сопротивление велико (разомкнутое состояние ключа). Такие ключи называются магнитными (МК). Они в настоящее время получают применение. Как показали исследования [6.3], МК обладают целым рядом положительных свойств по сравнению с ЭК: габаритные размеры с ростом частоты питания уменьшаются, большой срок службы, высокий КПД, высокая надежность, помехозащищенность,

стойкость к воздействию излучений, вибраций и высоких температур. На рис. 6.16 представлена схема стабилизатора напряжения, использующего МК. С целью снижения массы и габаритных размеров стремятся использовать высокую частоту, доходящую до 1 МГц. ЭДС высокой частоты от источника питания через трансформатор *TV* подается на однообмоточный МУС. В рабочий полупериод, пока магнитопровод МУС не насыщен, ток через нагрузку не протекает. В момент $\omega t_s = \alpha$ происходит насыщение магнитопровода, сопротивление обмотки МУС становится равным нулю и под действием ЭДС e ток проходит через МУС, диод *VD1*, фильтр $L_\Phi C_\Phi$ и нагрузку $R_н$. В следующий полупериод диод *VD1* закрывается и размагничивание МУС производится с помощью той же обмотки через диод *VD2*.

С потенциометра R снимается напряжение U_R, пропорциональное напряжению на нагрузке. Со стабилитрона *VD3* снимается опорное напряжение $U_{ст}$. Разница напряжений $U_R - U_{ст}$ подается на транзистор *VT*, коллекторный ток которого является током управления $I_у$. Если $U_R > U_{ст}$, то транзистор открывается и через МУС протекает размагничивающий ток управления. Ток в нагрузке уменьшается. При $U_R = U_{ст}$ транзистор закрывается, через нагрузку протекает наибольший ток.

На рис. 6.16, *б* показано изменение основных величин: e — ЭДС источника переменного тока, $u_{МУС}$ — напряжение на МУС; $i_н$ — ток нагрузки; α — угол насыщения. В течение $\omega t_s = \alpha$ идет намагничивание МУС от начальной индукции $B_у$ до индукции насыщения B_s. МУС ненасыщен и все напряжение приложено к нему. Ток в цепи рабочей обмотки равен нулю. После насыщения *МУС* напряжение на нем падает до нуля и по нагрузке протекает ток $i_н$. После прохождения нуля тока процесс размагничивания *МУС* идет под действием тока управления $I_у$. На базе этой схемы созданы стабилизированные источники питания, которые по своим характеристикам не уступают стабилизаторам на основе ЭК [6.3].

6.7 РЕВЕРСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

а) **Реверсивные ДМУ.** В рассмотренных выше МУ изменение полярности сигнала управления не вызывает изменения фазы или знака тока нагрузки. В то же время на практике, например, для реверса электродвигателей до-

вольно часто требуется получить изменение фазы тока нагрузки на 180° (при переменном токе) или изменение знака тока нагрузки (на постоянном токе). Магнитные усилители, выполняющие такую функцию, называются реверсивными.

В схеме реверсивного ДМУ (рис. 6.17) от вторичной обмотки питающего трансформатора *Тр*, имеющей среднюю точку, питаются рабочие обмотки двух магнитных усилителей *ДМУ1* и *ДМУ2*. Ток нагрузки $I_н = I_1 - I_2$, где I_1 — ток *ДМУ1*, I_2 — ток *ДМУ2*. Поскольку ток нагрузки определяется разностью этих токов, такая схема называется дифференциальной.

Рассмотрим случай, когда токи смещения $I'_{см1} = I'_{см2} = 0$. Здесь $I'_{см1} = I_{см1} w_{см}/w_р$, $I'_{см2} = I_{см2} w_{см}/w_р$. Для получения необходимой характеристики управления оба усилителя должны быть идентичными. В этом случае ток нагрузки $I_н = 0$, поскольку при любом значении тока управления соблюдается равенство $I_1 = I_2$. Создадим такое поле смещения, чтобы характеристика управления *ДМУ1* переместилась влево на $I'_{см1}$, а аналогичная характеристика *ДМУ2* — вправо на тот же отрезок (рис. 6.18). Результирующая характеристика обеспечивает равенство $I_н = 0$ при отсутствии сигнала управления. Точная установ-

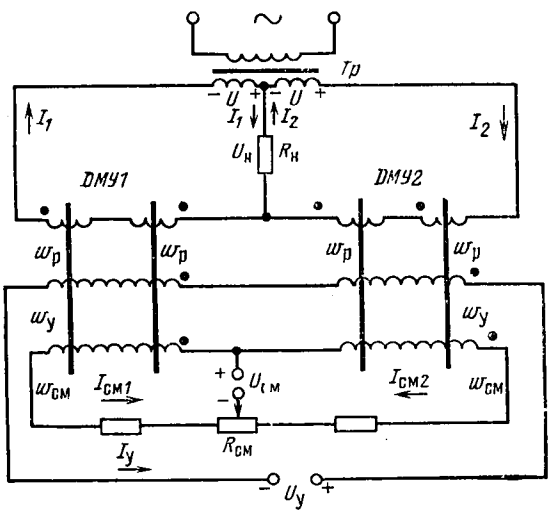


Рис. 6.17. Реверсивная схема на ДМУ

ка нуля производится переменным резистором $R_{см}$. При положительном сигнале управления ток I_1 будет возрастать, а ток I_2 снижаться. Если зависимости $I_1(I'_у)$ и $I_2(I'_у)$ линейны, то

$$I_н = I_1 - I_2 = I_0 + I'_{см} + I'_у - (I_0 + I'_{см} - I'_у) = 2I'_у.$$

Наклон рабочего линейного участка результирующей характеристики управления и коэффициент усиления по току реверсивной схемы в 2 раза больше, чем для отдельного ДМУ.

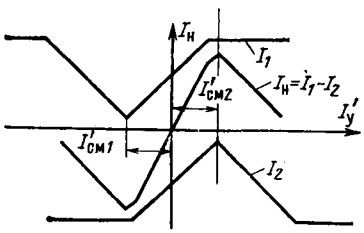


Рис. 6.18. Характеристика управления реверсивного ДМУ

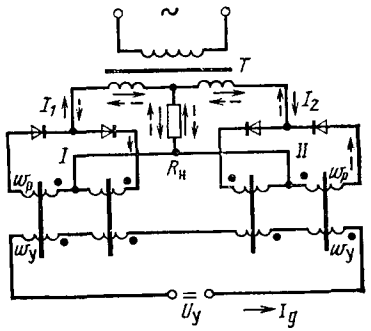


Рис. 6.19. Реверсивная схема на двух МУС

Поскольку результирующий ток холостого хода $I_{н0}=0$, кратность изменения тока в нагрузке $I_{н\,max}/I_{н0}\to\infty$.

б) **Реверсивные МУ с самоподмагничиванием.** Схема рис. 6.19 принципиально не отличается от предыдущей (обмотка $w_{см}$ не показана). На рис. 6.20 показано влияние смещения характеристик управления МУС *I* и *II* на результирующую характеристику управления. В случае рис. 6.20, *в* эта характеристика линейна в широком диапазоне и обеспечивает большой коэффициент усиления по току.

При нагрузке постоянного тока широко применяется дифференциальная реверсивная схема рис. 6.21. *МУ1* и *МУ2* собраны по схеме рис. 6.10 и работают на балластные резисторы $R_б$. Напряжение на нагрузке $R_н$ равно разности напряжений на балластных резисторах, поэтому рассматриваемый усилитель является дифференциальным. Для уменьшения взаимного влияния *МУ1* и *МУ2* необходимо, чтобы $R_б \ll R_н$.

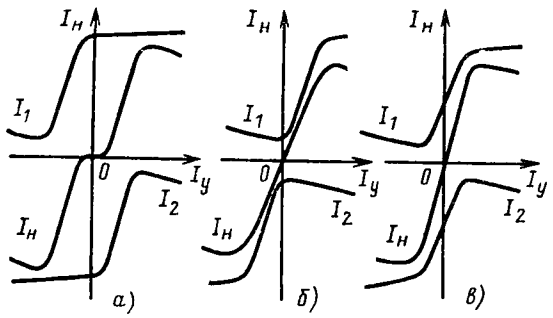


Рис. 6.20. Характеристики управления реверсивного МУС при различных МДС смещения:

а — смещение отсутствует; *б* — характеристики смещены так, что при $I_у=0$ в каждом усилителе ток нагрузки минимален; *в* — при $I_у=0$ рабочие точки МУ1 и МУ2 находятся посередине характеристик управления

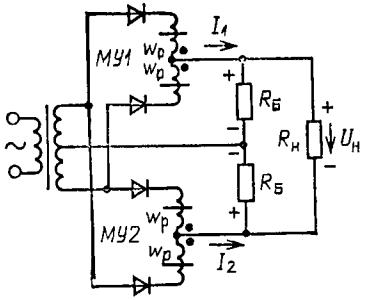


Рис. 6.21. Дифференциальная реверсивная схема МУС с нагрузкой постоянного тока

Рассмотренная схема обладает низким КПД рабочей цепи, так как большая часть выходной мощности тратится в балластных резисторах. Такая схема применяется при малых мощностях нагрузки. При больших мощностях используются схемы с повышенным КПД [6.2].

6.8. БЕСКОНТАКТНЫЕ МАГНИТНЫЕ РЕЛЕ НА ОСНОВЕ МУС

МУС может быть переведен в релейный режим, что позволяет создать бесконтактное магнитное реле (БМР). Для получения релейного режима в МУС необходимо дополнительно ввести обмотку обратной связи $w_{о.с}$. На рис. 6.22 показана схема, в которой ток обратной связи $I_{о.с}$ пропорционален напряжению на нагрузке $U_н$. Результирующее поле управления определяется МДС обмотки

управления $I_y w_y$ и МДС обмотки обратной связи $I_{о,с} w_{о,с}$. На рис. 6.23 показана характеристика управления МУС без обратной связи (кривая *I*). Ток обратной связи $I'_{о,с}$, приведенный к обмотке управления,

$$I'_{о,с} = \frac{I_{о,с}\, w_{о,с}}{w_y} = \frac{U_н}{R_{о,с} + R_{доб}} \frac{w_{о,с}}{w_y} = k_{о,с}\, U_н,$$

где $R_{о,с}$ — сопротивление обмотки обратной связи; $R_{доб}$ — добавочное сопротивление для регулировки обратной связи.

Таким образом, подмагничивающий ток обмотки обратной связи $I'_{о,с}$ пропорционален напряжению на нагрузке $U_н$, а коэффициент пропорциональности является коэффициентом обратной связи $k_{о,с}$. Проведем луч обратной связи *II* под углом α к вертикальной оси ($\operatorname{tg}\alpha \equiv I'_{о,с}/U_н$). Пересечение луча *II* с характеристикой управления *I* (точка *0*) определит напряжение на нагрузке $U_{н0}$ при токе управления $I_y = 0$. Действительно, для напряжения на нагрузке $U_{н0}$ необходим ток $I_{y,р} = I'_{о,с}$. Если подать положительный ток управления I_{y5}, то луч *II* необходимо проводить из точки *8* на оси абсцисс под углом α к вертикали. Состояние МУС определится точкой пересечения *9*. Напряжение на нагрузке практически не изменится Поле управления создается двумя обмотками w_y и $w_{о,с}$:

$$I_{y,р}\, w_y = H_y\, l = I_y w_y + I_{о,с}\, w_{о,с},$$

где $I_{y,р}$ — результирующий приведенный ток управления,

$$I_{y,р} = I_y + I'_{о,с}.$$

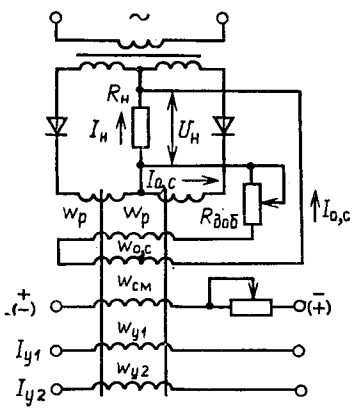


Рис. 6.22. Схема МУС с обратной связью по напряжению нагрузки

Для любого режима состояние МУС определится точкой пересечения луча *II* и кривой *I*. При отрицательном токе управления I_{y1} ($I_{y1} < 0$) состояние МУС определится точкой *1*. Выходное напряжение равно $U_{н1}$. Следует отметить, что току I_{y1} соответствуют точки пересечения *6* и *7*. Точка *6* является точкой неустойчивого рав-

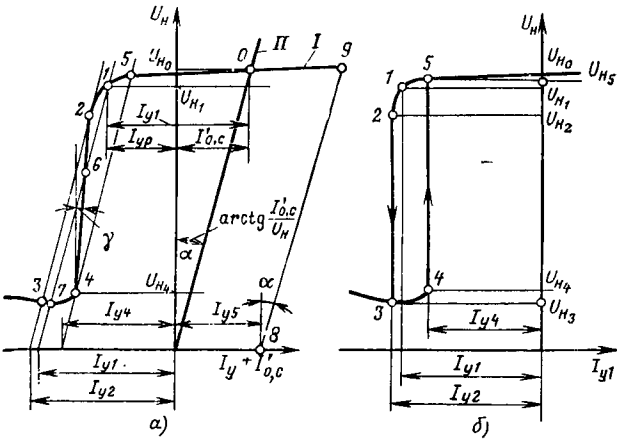


Рис. 6.23. Построение релейной петли МУС

повесия [6.1]. В точку 7 усилитель может попасть при переходе на ветвь *3*, *7*, *4*. При токе управления $I_{у2}$ МУС находится в критическом состоянии — при малейшем увеличении по модулю $I_{у2}$ напряжение на нагрузке меняется скачком со значения $U_{н2}$ до значения $U_{н3}$.

Таким образом, МУС с обратной связью аналогичен контактному реле с размыкающим контактом: при $I_у=0$ напряжение на нагрузке $U_н=U_{н0}$ и максимально (контакты замкнуты), при $I_у=I_{у2}$ напряжение $U_н$ минимально и равно $U_{н3}$ (контакты разомкнуты). В реальных МУС отношение $U_{н2}/U_{н3}\geqslant 100$, а значение $U_{н3}$ очень мало. Для получения релейного режима должно соблюдаться неравенство $\alpha>\gamma$, где γ — угол между вертикалью и линейной частью характеристики *I*. Результирующая характеристика $U_н(I_у)$ МУС в релейном режиме представлена на рис. 6.23, *б*.

Если в МУС введена обмотка смещения, то в зависимости от ее МДС можно получить БМР с различными видами «контактов». При отрицательном смещении $I_{см1}w_{см1}/w_у<0$ БМР выполняет функции реле с замыкающим контактом (рис. 6.24, *а*). Коэффициент возврата БМР, представляющий собой отношение МДС отпускания $I_{у,отп}w_у$ к МДС срабатывания $I_{у,ср}w_у$,

$$k_в=\frac{I_{у,отп}w_у}{I_{у,ср}w_у}=\frac{I_{у,ср}-\Delta}{I_{у,ср}}=1-\frac{\Delta}{I_{у,ср}}.$$

Коэффициент возврата тем меньше, чем больше ширина релейной петли Δ. В свою очередь величина Δ зависит от коэффициента обратной связи $k_{о.с}$. Чем больше $k_{о.с}$, тем больше α и тем шире релейная петля.

При отсутствии обмотки смещения БМР выполняет функции размыкающего контакта (рис. 6.23, *б*). Коэффициент возврата для этого случая

$$k_в = I_{у2}/I_{у4}.$$

Если отрицательное смещение $I_{см2}w_{см2}/w_у < I_{см1}w_{см1}/w_у$, то характеристика управления принимает вид рис. 6.24, *б*. В этом случае реле может находиться в двух устойчивых состояниях. Если вначале состояние БМР соответствовало

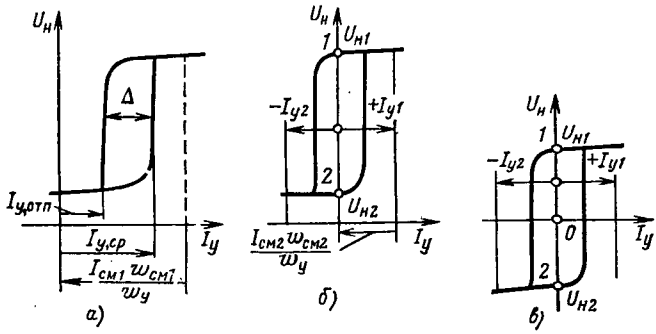


Рис. 6.24. Характеристики БМР

точке *1* и был подан положительный сигнал $+I_{у1}$, то после снятия сигнала напряжение на нагрузке останется равным $U_{н1}$. При подаче отрицательного сигнала $-I_{у2}$ напряжение упадет до напряжения $U_{н2}$ и останется равным этому значению после снятия сигнала. В БМР на реверсивных усилителях можно получить изменение знака напряжения на нагрузке (рис. 6.24, *в*). Минимальная мощность срабатывания БМР достигает 10^{-10} Вт. Отсутствие контактов и подвижных частей делает БМР исключительно надежными, износостойкими, вибро- и ударостойкими, пригодными для работы во взрывоопасных средах. В то же время БМР обладают и рядом недостатков:

1. При прямоугольной форме управляющего напряжения постоянная составляющая магнитного потока нарастает с постоянной времени цепи управления $T_у$. При этом происходит замедление времени срабатывания, обусловлен-

ное электромагнитным процессом в обмотке управления.

2. Параметры БМР зависят от напряжения и частоты питания, а также от температуры окружающей среды, что требует специальных мер по температурной стабилизации [6.1].

3. В положении, соответствующем $U_н=0$, нагрузка остается электрически связанной с источником питания рабочих обмоток.

4. Схемы БМР, особенно при большом числе управляемых цепей, бывают сложными и громоздкими.

5. КПД рабочей цепи БМР значительно ниже, чем у контактных коммутирующих аппаратов.

6. При большой мощности нагрузки масса и габариты БМР значительно больше, чем у контактных коммутирующих аппаратов той же мощности.

Как правило, в сложных электрических аппаратах большие токи коммутируются контактными или полупроводниковыми устройствами и только входные элементы таких аппаратов могут выполняться на МУ.

6.9. МАТЕРИАЛЫ МАГНИТОПРОВОДОВ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Для изготовления магнитопроводов МУ используются электротехнические стали (сплавы железа и кремния) и пермаллои (сплавы железа, никеля и других металлов) [6.2]

Чем выше индукция насыщения B_s материала магнитопровода, тем больше мощность МУ.

В усилителях малой мощности целесообразно применять сплавы 79НМ, 79НМА, 80НХС, 74НМД, 76НХД с небольшой индукцией насы-

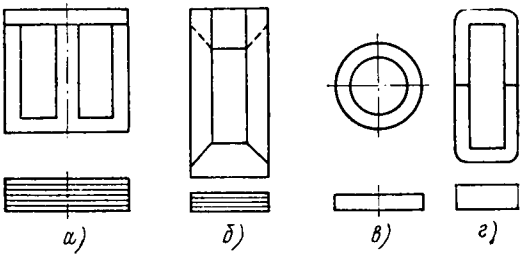


Рис. 6.25. Магнитопроводы магнитных усилителей:

а — Ш-образный; *б* — П-образный с косым стыком между пластинами; *в* — тороидальный; *г* — ленточный витой, разрезной

щения, но позволяющие получить высокий коэффициент усиления. Эти сплавы имеют высокую стоимость.

При больших мощностях целесообразно применять более дешевые холоднокатаные стали с высокой индукцией насыщения.

К магнитопроводам МУ предъявляются требования максимального использования магнитных свойств материала, возможности изготовления МУ минимальных габаритов и массы, технологичности изготовления как самих магнитопроводов, так и обмоток. С точки зрения использования магнитного материала необходимо отсутствие воздушных зазоров в магнитной цепи. Даже очень малые воздушные зазоры резко ухудшают характеристики МУ, так как МДС, необходимая для проведения потока управления через воздушный зазор, может быть соизмерима с МДС, затрачиваемой на создание поля управления. При этом ухудшаются коэффициенты усиления, чувствительность и другие параметры. Оптимальным является магнитопровод тороидальной формы, набранный

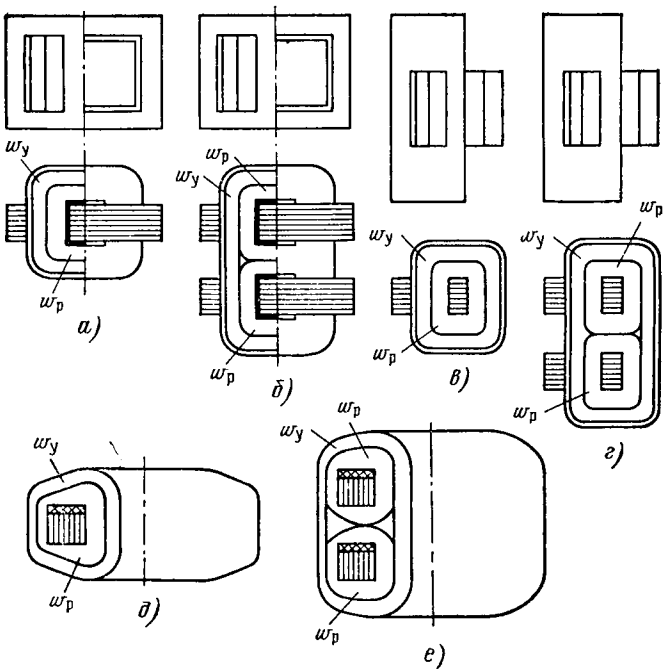


Рис. 6.26. Расположение обмоток на магнитопроводе:

а — Ш-образный с отдельной $w_у$; *б* — с общей обмоткой $w_у$; *в* — П-образный с отдельной $w_у$, *г* — с общей обмоткой $w_у$; *д* — тороидальный с отдельной, *е* — с общей обмоткой $w_у$

из кольцеобразных штампованных пластин или намотанный из тонкой ленты. Применяемые для МУ магнитопроводы показаны на рис. 6.25. Для МУ малой мощности и с высоким коэффициентом усиления применяется ленточный магнитопровод (рис. 6.25, *в*), при больших мощностях — магнитопроводы по рис. 6.25, *а*, *б* и *г*.

В зависимости от схемы МУ и типа магнитопровода меняется место расположения обмоток (рис. 6.26). Рабочая обмотка $w_р$ и обмотка управления $w_у$ располагаются на среднем стержне (рис. 6.26, *а*). Общая обмотка управления располагается, как показано на рис. 6.26, *б*. Применение общей обмотки $w_у$ позволяет снизить габариты МУ и уменьшить сопротивление цепи управления. Следует отметить, что при общей обмотке управления ухудшаются условия теплоотдачи. При этом также усложняется технология изготовления.

Часть вторая.

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Глава седьмая

КОНТРОЛЛЕРЫ, КОМАНДОАППАРАТЫ И РЕОСТАТЫ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

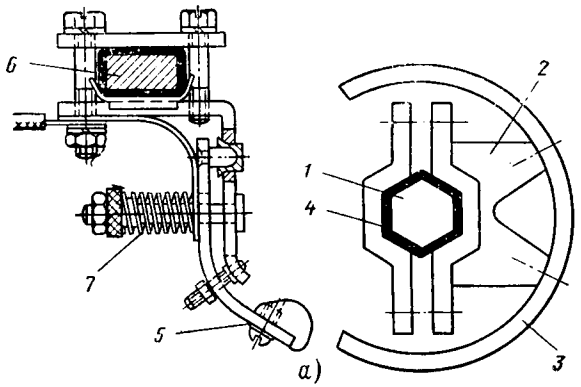
Контроллером называется электрический аппарат с ручным управлением, предназначенный для изменения схемы подключения электродвигателя к электропитанию. По конструктивному исполнению контроллеры делятся на барабанные, кулачковые и плоские.

Командоаппаратом называется устройство, предназначенное для переключений в цепях управления силовых электрических аппаратов (контакторов). Иногда они применяются для непосредственного пуска электродвигателей малой мощности, включения электромагнитов и другого электрооборудования. Командоаппараты могут иметь ручной привод (кнопки, ключи управления, командоконтроллеры) или приводиться в действие контролируемым механизмом (путевые выключатели).

Реостат является совокупностью резисторов и контроллера, позволяющей изменять вводимое в цепь сопротивление.

7.2. КОНТРОЛЛЕРЫ

а) **Барабанные контроллеры.** На рис. 7.1 показан контактный элемент барабанного контроллера. На валу *1* укреплен сегментодержатель *2* с подвижным контактом в виде сегмента *3*. Сегментодержатель изолирован от вала изоляцией *4*. Неподвижный контакт *5* расположен на изолированной рейке *6*. При вращении *1* сегмент *3* набегает на неподвижный контакт *5*, чем осуществляется замыкание цепи. Необходимое контактное нажатие обеспечивается пружиной *7*. На одном валу устанавливается ряд таких контактных элементов. Сегментодержатели соседних контактных элементов можно соединять между собой в различных необходимых комбинациях. Определенная последовательность замыкания различных контактных элементов обеспечивается различной длиной их сегментов. Схема соединений сегментодержателей для пуска



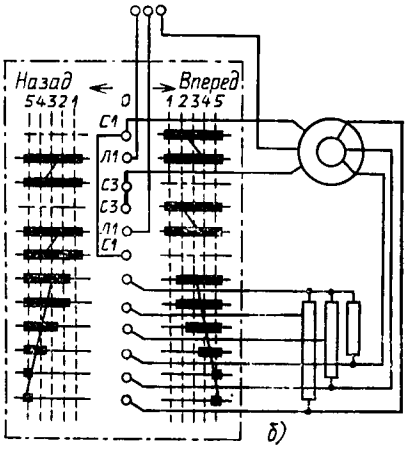


Рис. 7.1. Контактный элемент барабанного контроллера (*а*): схема соединения для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором (*б*)

асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис. 7.1, *б*. Неподвижные контакты контроллера обозначены *С1, Л1, С3, Л3*, жирными горизонтальными линиями обозначены подвижные контакты-сегменты, косыми линиями — перемычки между сегментами. В положении «Вперед» обмотка статора подключается к напряжению сети, а резисторы в цепях обмотки ротора включены полностью. По мере вращения барабана эти резисторы выводятся из цепи обмотки ротора.

Вследствие малой износостойкости контактов допустимое число включений контроллера в час не превышает 240. При этом мощность запускаемого двигателя приходится снижать до 60 % номинальной, из-за чего такие контроллеры применяются при редких включениях.

б) **Кулачковые контроллеры.** В кулачковом контроллере переменного тока (рис. 7.2) перекатывающийся подвижный контакт *1* имеет возможность вращаться относительно центра O_2, расположенного на контактном рычаге *2*. Контактный рычаг *2* поворачивается относительно центра O_1. Контакт *1* замыкается с неподвижным контактом *3* и соединяется с выходным контактом с помощью гибкой связи *4*. Замыкание контактов *1*, *3* и необходимое контактное нажатие создаются пружиной *5*, воздействующей на контактный рычаг через шток *6*. При размыкании контактов кулачок *7* действует через ролик *8* на контактный рычаг. При этом сжимается пружина *5* и контакты *1*, *3* размыкаются. Момент включения и отключения контактов зависит от профиля кулачковой шайбы *9*, приводящей в действие контактные элементы. Малый износ контактов позволяет увеличить число включений в час до 600 при ПВ-60 %. В контроллер входят два комплекта контактных элементов *I* и *II*, рас-

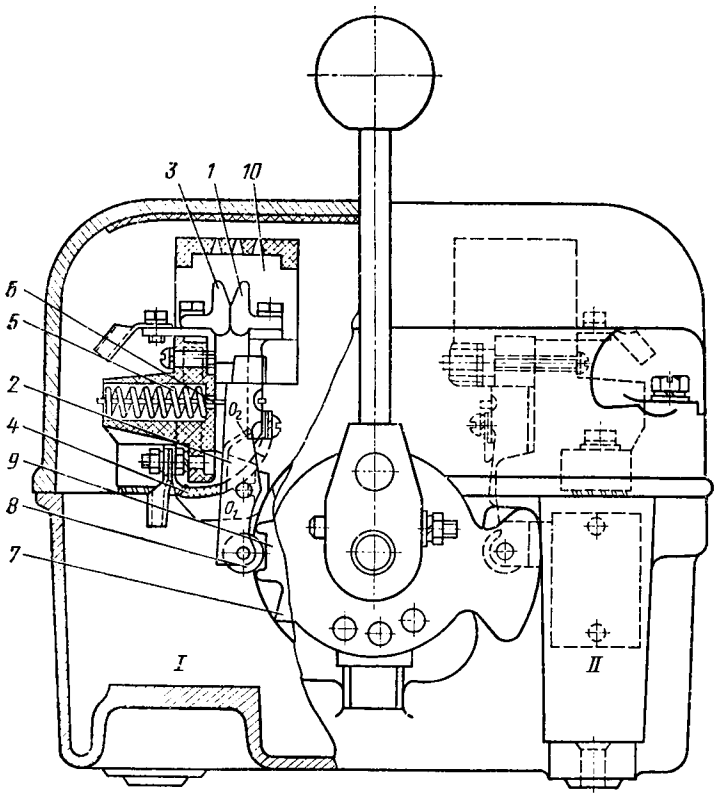


Рис. 7.2. Кулачковый контроллер

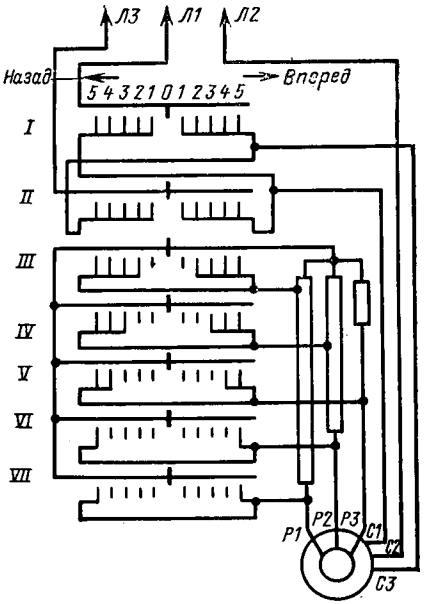


Рис. 7.3. Схема соединений кулачкового контроллера для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

положенных по обе стороны кулачковой шайбы *9*, что позволяет резко сократить осевую длину устройства. Как в барабанном, так и в кулачковом контроллере имеется механизм для фиксации положения вала. Контроллеры переменного тока в виду облегченного гашения дуги могут не иметь дугогасительных устройств. В них устанавливаются только дугостойкие асбестоцементные перегородки *10*. Контроллеры постоянного тока имеют дугогасительное устройство, аналогичное применяемому в контакторах (§ 4.11 б).

Выключение рассмотренного контроллера происходит при воздействии на рукоятку и передаче этого воздействия через кулачковую шайбу, включение происходит с помощью силы пружины *5* при соответствующем положении рукоятки. Поэтому контакты удается развести даже в случае их сваривания. Недостаток конструкции заключается в большом моменте на валу за счет включающих пружин при значительном числе контактных элементов. Надо отметить, что возможны и другие конструктивные решения привода контактов контроллера.

На рис. 7.3 показана схема для пуска асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью кулачкового контроллера. Контакты обозначены римскими цифрами, позиции вала аппарата — арабскими. При пуске «Вперед» работают контактные элементы, расположенные справа. Например, в третьей позиции замкнуты контакты *I—IV*. При этом статор подключен к сети, а в цепи ротора выведены первые ступени пусковых резисторов в двух фазах. В положении *5* все контакты замкнуты и ротор двигателя закорочен.

в) **Плоские контроллеры.** При большом числе контактов габариты и масса кулачковых и барабанных контроллеров резко возрастают. В этом случае, если число операций в час при регулировании и пуске

невелико (10—12), применяются плоские контроллеры. В плоском контроллере на плите из изоляционного материала располагаются неподвижные контакты, по которым скользит подвижный контакт мостикового типа, одновременно соприкасающийся с токосъемной шиной. Такой контроллер показан на рис. 7.19, где по неподвижным цилиндрическим контактам *0 — 13* и шинам *14*, *15* скользит подвижный контакт *16* мостикового типа.

7.3. КОМАНДОАППАРАТЫ

а) **Кнопки управления.** Простейшим командоаппаратом является кнопка управления. Кнопка используется для схем пуска, остановки и реверса электродвигателей путем замыкания и размыкания обмоток контакторов, которые коммутируют главную цепь, а также для управления самыми различными схемами автоматики. Один из вариантов конструктивного выполнения кнопки управления показан на рис. 7.4. Для повышения надежности контакты часто выполняются из серебра. При переменном токе электрическая дуга надежно гаснет при напряжении до 500 В и токе 3 А благодаря двум размыкающим контактам для одной коммутируемой цепи. При постоянном токе и напряжении 440 В отключаемый ток не превышает 0,15 А. При использовании кнопки для включения электромагнитов переменного тока (например, контакторов) ее контакты в замкнутом положении должны надежно пропускать пусковые токи обмоток, которые могут достигать 60 А. Следует отметить, что схемы управления целесообразно проектировать так, чтобы непосредственное отключение цепи производилось не кнопкой, а другим, более мощным аппаратом, имеющим вспомогательные контакты. В том случае, когда необходимо производить переключение нескольких цепей по определенной программе с большой частотой включений, применяются командоконтроллеры.

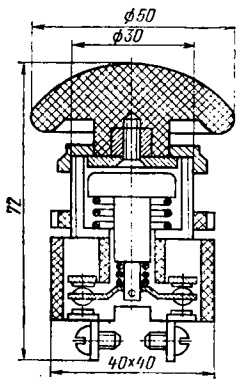


Рис. 7.4. Кнопка управления

б) **Командоконтроллеры.** Широкое распространение получили нерегулируемые кулачковые командоконтроллеры. На рис. 7.5 показан нерегулируемый командоконтроллер постоянного тока, по принципу устройства аналогичный кулачковому контроллеру. С помощью мостикового контакта *1* в отключаемой цепи создаются два разрыва, что облегчает гашение дуги. Кулачковый привод, большое расстояние контактов от центра вращения *0* рычага *2*, большой междуконтактный промежуток позволяют получить высокую скорость расхождения контактов и увеличить ток от-

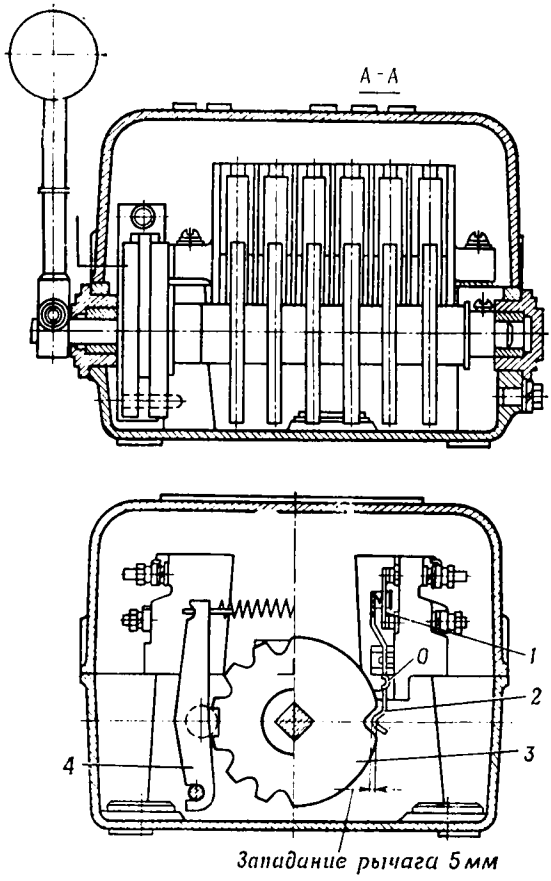


Рис. 7.5. Нерегулируемый кулачковый командоконтроллер

ключения почти в 4 раза по сравнению с током отключения кнопочного элемента. Моменты замыкания и размыкания контактов зависят от профиля кулачка *3*. Положение вала фиксируется с помощью рычажного фиксатора *4*. С помощью командоконтроллера производится управление силовыми контакторами, которыми в свою очередь коммутируются силовые цепи.

При необходимости точной регулировки момента срабатывания применяются регулируемые кулачковые командоконтроллеры. Устройство одного элемента такого контроллера показано на рис. 7.6, *а*. На валу *1* укрепляется диск *3* из изоляционного материала. По окружности диска

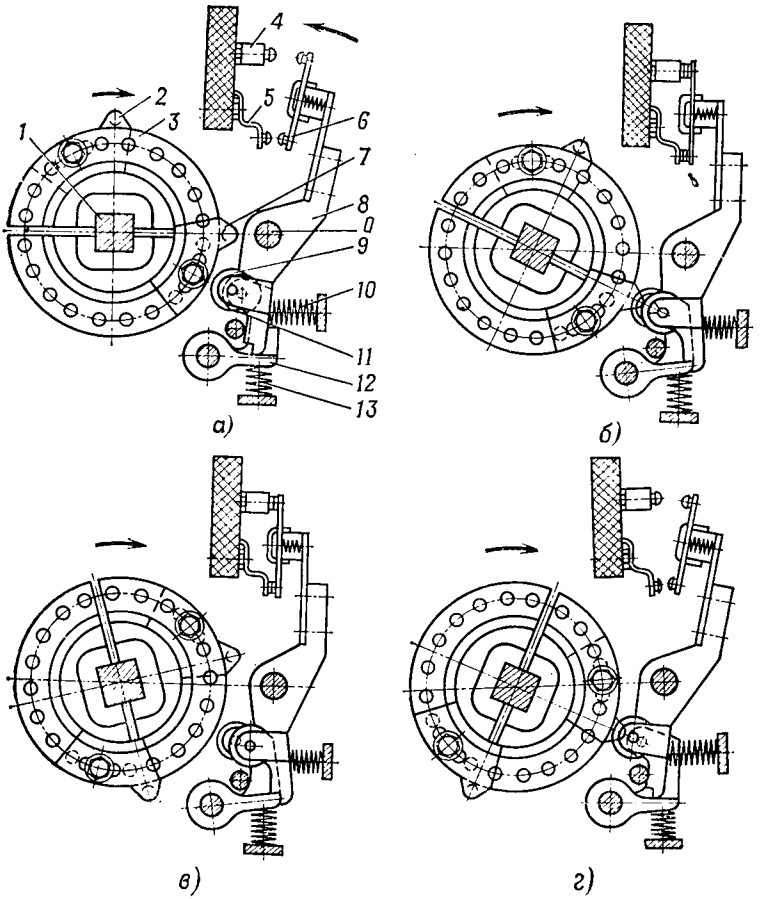


Рис. 7.6. Регулируемый кулачковый командоконтроллер

расположены отверстия для крепления кулачков *2* и *7*. При нажиме кулачка *7* на ролик *9* контактный рычаг *8* поворачивается относительно центра *0* против часовой стрелки и неподвижные контакты *4* и *5* замыкаются мостиком *6*. Контактный рычаг фиксируется во включенном положении защелкой *12*, которая удерживается пружиной *13* в пазу нижней части рычага *8* (рис. 7.6, *б*). Одновременно сжимается возвратная пружина *10*. При дальнейшем вращении диска кулачок *2* набегает на ролик *11* защелки *12* и выбивает последнюю. Под действием пружины *10* происходит размыкание контактов (рис. 7.6, *г*). Достоинством механизма является независимость скорости размыкания контактов от

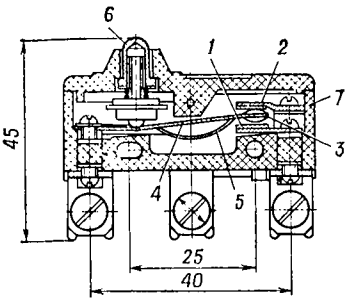


Рис. 7.7. Путевой микропереключатель

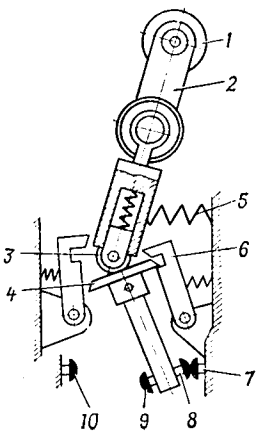


Рис. 7.8. Рычажный путевой переключатель

частоты вращения вала. Это дает возможность использовать регулируемый командоконтроллер в качестве путевого выключателя с малой частотой вращения вала.

Момент замыкания и размыкания контактов может регулироваться в широких пределах с большой точностью. При грубой регулировке кулачок устанавливается в различные положения на диске (точность установки 18°). Для точной регулировки предусмотрена овальная форма отверстия для крепления кулачка, что позволяет смещать его на ±10°30′ относительно центра отверстия.

В регулируемом командоконтроллере можно установить на каждом диске до трех включающих и трех выключающих кулачков. Число коммутируемых цепей может меняться от 4 до 12, что позволяет использовать командоконтроллер для управления сложными схемами автоматики. Вращение вала командоконтроллера осуществляется специальным исполнительным двигателем, что обеспечивает дистанционное управление им.

в) **Путевые (позиционные) выключатели (переключатели) и микровыключатели.** Путевой выключатель предназначен для замыкания или размыкания слаботочных сигнальных цепей в зависимости от пространственного положения (позиции) рабочего органа управляемого электропривода. Частным случаем путевых являются конечные (концевые) выключатели, обеспечивающие коммутацию сигнальных цепей только в крайних положениях хода рабочего органа. Контактные путевые выключатели можно подразделить на кнопочные и рычажные. В кнопочном путевом выключателе контролируемый рабочий орган воздействует

на шток кнопочного элемента (см. рис. 7.4). Размыкание и замыкание контактов происходит со скоростью перемещения контролируемого органа. При скорости штока меньше 0,4 м/мин необходимо применять выключатели с повышенным быстродействием, обеспечивающие необходимую скорость размыкания контактов.

Если требуется остановить рабочий орган привода или при его приближении выполнить соответствующие переключения с высокой точностью $(0{,}3 \div 0{,}7) \cdot 10^{-3}$ м, применяются путевые (конечные) микропереключатели. На рис. 7.7 показан микропереключатель с одним переключающим контактом. Неподвижные контакты *1* и *2* укреплены в пластмассовом корпусе *7*. Подвижный контакт *3* укреплен на конце специальной пружины, состоящей из плоской *4* и фигурной *5* частей. В изображенном на рис. 7.7 положении пружина создает давление на контакт *2*. При нажатии рабочего органа на головку *6* происходят деформация пружины и переброс контакта *3* в нижнее положение за время 0,01—0,02 с, что обеспечивает надежное отключение цепи. Ход головки *6* составляет десятые доли миллиметра. Микровыключатели ВМК-ВЗГ, например, отключают ток 2,5 А при постоянном напряжении 220 и переменном 380 В.

При больших ходах рабочего органа и больших токах применяются рычажные путевые переключатели. Принцип действия одного из исполнений таких переключателей показан на рис. 7.8. Контролируемый рабочий орган привода воздействует на ролик *1*, укрепленный на конце рычага *2*. На другом конце рычага находится подпружиненный ролик *3*, который может перемещаться вдоль оси рычага. В указанном на рисунке положении замкнуты контакты *7* и *8*. Положение контактов надежно зафиксировано защелкой *6*. При воздействии на ролик *1* рычаг *2* поворачивается против часовой стрелки. Ролик *3* поворачивает тарелку *4* и связанные с ней контакты *8* и *9*. При этом контакты *7* и *8* размыкаются, а *9* и *10* замыкаются.

Благодаря наличию пружин замыкание и размыкание контактов происходит с большой скоростью, не зависящей от скорости движения ролика *1*. Это дает возможность отключать токи до 6 А при напряжении до 220 В постоянного тока. Возврат в исходное положение после прекращения воздействия на ролик *1* производится пружиной *5*.

При большом числе переключаемых цепей и большой точности в качестве путевого переключателя применяется регулируемый командоконтроллер. Его вал связывается с рабочим органом либо непосредственно, либо через редуктор, согласующий движение рабочего органа и кулачковой шайбы. Контактные путевые переключатели обеспечивают точность срабатывания $\pm 0{,}02 \div 0{,}05$ мм при износостойкости до $(5 \div 10) \cdot 10^6$ переключений и благодаря простоте конструкции находят широкое применение. Для повышения надежности и долговечности в контактных путевых выключателях часто применяются герметичные магнитоуправляемые контакты-герконы (см. § 11.4), на базе которых, на-

пример, создана серия выключателей ВСГ. С контролируемым рабочим органом жестко связана пластина из магнитомягкой стали. Эта пластина входит в узкую щель, с одной стороны которой расположен геркон, а с другой — постоянные магниты (рис. 11.16). При вхождении в щель пластины через нее замыкается поток постоянного магнита. Магнитный поток в герконе исчезает, и происходит его переключение. Выключатель имеет замыкающий и размыкающий контакты, коммутирующие ток 0,01—1 А при напряжении постоянного тока до 110 В и ток 0,025 — 0,2 А при напряжении 220 В переменного тока. Допустимая частота переключений достигает 6000 в час. Износостойкость составляет 10^6—10^8 переключений.

Современные требования к надежности и увеличенной частоте срабатывания привели к созданию бесконтактных путевых выключателей. В таких выключателях контролируемый рабочий орган воздействует не

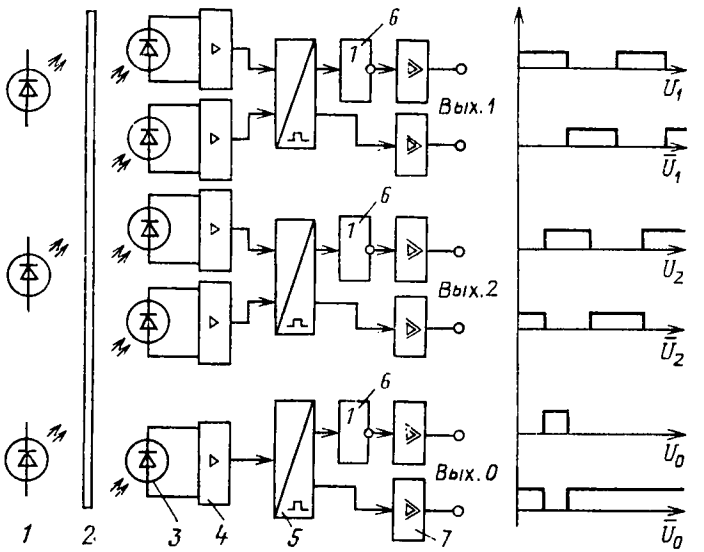


Рис. 7.9. Путевой выключатель на оптронных элементах

на контакты, а на бесконтактные датчики. Датчики могут быть индуктивными, индукционными, магнитомодуляционными, оптическими и др. Вырабатываемый датчиками сигнал используется для управления электроприводом.

На базе оптронных элементов (§ 12.5) создан путевой выключатель серии ВПФ-11-01 (рис. 7.9). Источником светового сигнала является арсенид-галлиевый светодиод *1*, приемником — кремниевый фотодиод *3*. Выключатель обеспечивает отключение привода при повороте выходно-

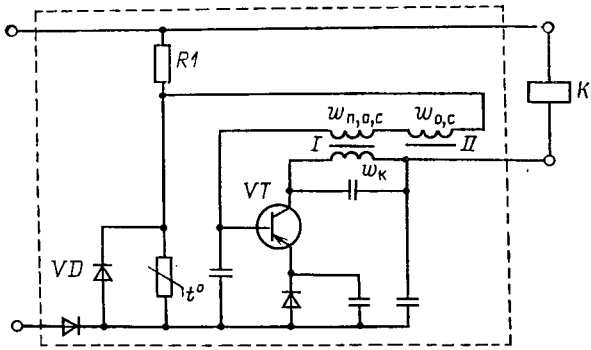


Рис. 7.10. Схема бесконтактного путевого переключателя БВК-24

го вала на заданный угол. На вал контролируемого рабочего органа устанавливается сектор *2*, проходящий между источником света и приемником. Сигнал от фотодиода *3* подается на усилительный элемент *4*, после чего поступает на формирователь прямоугольных импульсов *5*. Выходной сигнал блока *5* подается либо непосредственно на выходной усилитель *7*, либо через блок *6 ИЛИ—НЕ*. В результате выходные напряжения $\overline{U}_1$, $\overline{U}_2$ являются отрицанием сигнала (§ 12.6). Угол, при котором происходит затемнение приемника, может регулироваться от 2 до 318°.

В бесконтактном путевом выключателе БВК-24 (рис. 7.10) используется индуктивный датчик на двух ферритовых магнитопроводах *I* и *II* с обмотками. Управление датчиком осуществляется с помощью алюминиевой пластины, жестко связанной с рабочим органом контролируемого механизма. При вхождении пластины в зазор между магнитопроводами в ней наводятся вихревые токи, за счет чего магнитная связь между обмотками положительной обратной связи $w_{п,о,с}$ и отрицательной обратной связи $w_{о,с}$ магнитопроводов *I* и *II* ослабляется. Это явление используется для получения генераторного режима усилителя на транзисторе *VT*. В результате через реле *K* начинает протекать ток и оно срабатывает. При выходе пластины из зазора под действием отрицательной обратной связи от обмотки $w_{о,с}$ генераторный режим прекращается и реле *K* отпускает.

г) **Универсальные переключатели.** Для схем управления электроприводом, электрических аппаратов и разнообразных устройств автоматики широко применяются универсальные переключатели (УП). Одна секция такого переключателя (рис. 7.11) имеет неподвижный контакт *1* и два подвижных контакта *2* и *3*. В секции можно использовать как два, так и один разрыв коммутируемой цепи. В последнем случае цепь

присоединяется к неподвижному контакту *1* и выводу одного из подвижных *4*. При повороте вала *5* поворачивается кулачок *6*, который воздействует на контактный рычаг *7* подвижного контакта, после чего происходит замыкание контактов. Использование одного или двух разрывов определяется значениями отключаемого тока и напряжения коммутируемой цепи. В наиболее тяжелых режимах контакты двух соседних секций соединяются последовательно, что обеспечивает четыре последовательных разрыва цепи. Номинальный ток переключателя 20 А. Число коммутируемых цепей (секций) изменяется от 2 до 16.

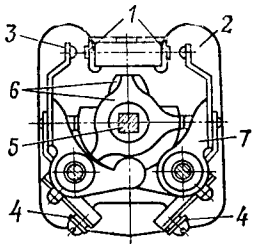


Рис. 7.11. Секция универсального переключателя УП

Благодаря большой отключающей способности и большому количеству коммутируемых цепей переключатели типа УП широко используются для пуска и реверса двигателей мощностью до 5 кВт при напряжении до 500 В. Эти переключатели удобны при реверсировании и регулировании частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения числа полюсов обмоток.

д) **Ключи управления.** При большом числе сложных и разнообразных коммутационных операций применяются переключатели управления. В отличие от переключателя УП вал переключателя управления имеет как фиксированные положения, так и нефиксированные, из которых он автоматически возвращается в исходное положение после прекращения воздействия оператора. Контактная система ключа аналогична контактной системе пакетного выключателя (см. § 15.3). Переключатель имеет

Обозначения цепи			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Положение ключа КУ	Условные обозначения положений	Положения рукоятки ключа														
Отключено	0		X	–	–	X	X	–	–	X	–	–	–	–	–	X
Предварительно включить	B_1		–	X	X	–	–	–	X	–	X	–	–	–	–	–
Включить	B_2		–	X	–	–	–	X	–	–	X	–	X	–	X	–
Включено	B		–	X	X	–	–	–	X	–	X	–	–	–	X	–
Предварительно отключить	O_1		X	–	–	X	X	–	–	X	–	–	–	–	X	–
Отключить	O_2		X	–	–	–	X	–	–	–	–	X	–	X	–	X

Рис. 7.12. Диаграмма коммутационных положений переключателя управления

два фиксированных положения рукоятки управления (горизонтальное и вертикальное) и два нефиксированных (45° от вертикали по часовой стрелке и 45° от горизонтали против часовой стрелки). На рис. 7.12 приведена диаграмма коммутационных положений переключателя управления. В положении «Отключено» (*О*) рукоятка переключателя горизонтальна. При этом замкнуты цепи *1, 4, 5, 8, 14*. При переводе рукоятки по часовой стрелке в положение «Предварительно включить» (B_1) замыкаются цепи *2, 3, 7, 9*, а цепи *1, 4, 5, 8, 14* размыкаются. Для включения аппарата рукоятка поворачивается по часовой стрелке на 45° (положение B_2) и замыкаются цепи *2, 6, 9, 11, 13*. После этого оператор отпускает рукоятку и она автоматически возвращается в вертикальное положение «Включено» (замыкаются цепи *2, 3, 7, 9* и *13*). При отключении рукоятка поворачивается сначала в горизонтальное положение «Предварительно отключить» (положение O_1), затем еще на 45° против часовой стрелки. После этого рукоятка автоматически устанавливается в положение *О*.

7.4. РЕЗИСТОРЫ ПУСКОВЫХ И ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИХ РЕОСТАТОВ

а) **Общие сведения.** В зависимости от назначения резисторы делятся на следующие группы:

пусковые резисторы для ограничения тока в момент подключения к сети неподвижного двигателя и для поддержания тока на определенном уровне в процессе его разгона;

тормозные резисторы для ограничения тока двигателя при его торможении;

регулировочные резисторы для регулирования тока или напряжения в электрической цепи;

добавочные резисторы, включаемые последовательно в цепь электрического аппарата с целью снижения напряжения на нем;

разрядные резисторы, включаемые параллельно обмоткам электромагнитов или других индуктивностей с целью ограничения перенапряжений при их отключении или для замедления отпускания реле и контакторов; такие резисторы используются также для разряда емкостных накопителей;

балластные резисторы, включаемые в цепь последовательно для поглощения части энергии или параллельно источнику с целью предохранения его от перенапряжений при отключении нагрузки;

нагрузочные резисторы для создания искусственной нагрузки генераторов и других источников; они используются при испытаниях электрических аппаратов;

нагревательные резисторы для нагрева окружающей среды или аппаратов при низких температурах;

заземляющие резисторы, включенные между землей и нулевой точкой генератора или трансформатора с целью ограничения токов КЗ на землю и возможных перенапряжений при замыкании на землю;

установочные резисторы для установки определенного значения тока или напряжения в приемниках энергии.

Пусковые, тормозные, разрядные и заземляющие резисторы в основном предназначены для работы в кратковременном режиме и должны иметь возможно большую постоянную времени нагрева. Особых требований к стабильности этих резисторов не предъявляется. Все остальные резисторы работают в основном в длительном режиме, требуют необходимой поверхности охлаждения. Сопротивление этих резисторов должно быть стабильным в заданных пределах. В зависимости от материала проводника различают резисторы металлические, жидкостные, угольные и керамические. В промышленном электроприводе наибольшее распространение получили металлические резисторы. Керамические резисторы (с нелинейным сопротивлением) широко применяются в высоковольтных разрядниках.

б) **Материал резисторов.** С целью уменьшения габаритных размеров резисторов удельное сопротивление использованного для его изготовления материала должно быть возможно выше. Допустимая рабочая температура материала также должна быть возможно больше, что позволяет сократить массу материала и необходимую поверхность охлаждения (см. § 2.4) Для того чтобы сопротивление резистора как можно меньше зависело от температуры, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистора должен быть возможно меньше. Материал резисторов, предназначенных для работы на воздухе, не должен подвергаться коррозии либо должен образовывать противостоящую ей защитную пленку.

В табл. 7.1. приведены основные свойства материалов, используемых для изготовления резисторов.

Сталь имеет малое удельное электрическое сопротивление. На воздухе сталь интенсивно окисляется и поэтому применяется только в реостатах, заполненных трансформаторным маслом. В этом случае рабочая температура стали определяется нагревом трансформаторного масла и не превышает 115 °С.

Из-за высокого значения ТКС сталь неприменима для резисторов со стабильным сопротивлением. Единственное достоинство стали — дешевизна.

Таблица 7.1. **Свойства материалов, используемых для изготовления резисторов и реостатов**

Наименование и состав	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, мкОм·м	Максимальная рабочая температура, °С	Температурный коэффициент сопротивления, $^{\circ}C^{-1}$
Манганин МНц3-12 (Cu, Mn, Ni+Co)	0,42—0,48	60	$(-2 \div +25) \times 10^{-6}$
Константан МНМц 40·1,5 (Cu, Ni+CoMn)	0,45—0,52	500	$2 \cdot 10^{-5}$
Нейзильбер МНц 15·20 (Cu, Zn, Ni+Co)	0,3—0,32	200	$36 \cdot 10^{-5}$
Нихром, Х15Н60Н (Fe, Ni, Cr)	1,07—1,17	1100	$17 \cdot 10^{-5}$
Жаростойкий сплав 0Х23Ю5 (Fe, Cr, Al)	1,29—1,45	1200	$8 \cdot 10^{-5}$
Чугун (Fe, C)	0,8	400	0,001
Сталь (проволока)	0,11—0,13	200—300	$(24 \div 48) \cdot 10^{-4}$
Сталь листовая электротехническая (Fe, Si)	0,3	150—200	0,002

Электротехнический чугун имеет значительно большее, чем сталь, удельное электросопротивление и значительный ТКС. Рабочая температура чугуна достигает 400 °С. Отлитые из чугуна резисторы, как правило, имеют зигзагообразную форму. Ввиду хрупкости чугуна необходимая механическая прочность элементов резистора достигается увеличением их сечения. Поэтому чугунные резисторы пригодны для работы при больших токах и мощностях.

Из-за недостаточной стойкости к механическим воздействиям (вибрациям, ударам) чугунные резисторы используются только в стационарных установках.

Удельное электрическое сопротивление листовой электротехнической стали за счет присадки кремния почти втрое выше, чем у обычной стали. Стальные резисторы имеют зигзагообразную форму и получаются из листовой стали штамповкой. Из-за большого ТКС листовая сталь применяется только для пусковых резисторов, как правило, устанавливаемых в трансформаторном масле.

Для резисторов с повышенной стабильностью сопротивления может применяться константан, который не подвергается коррозии на воздухе и имеет максимальную рабочую температуру 500 °С. Большое удельное сопротивление позволяет создавать на основе кон-

стантана малогабаритные резисторы. Константан широко применяется в виде проволоки и ленты.

Для изготовления нагревательных резисторов применяются в основном нихромы, которые обладают высокими удельным электросопротивлением и рабочей температурой.

В настоящее время для нагревательных резисторов широко применяется более дешевый жаростойкий сплав 0Х23Ю5. Удельное сопротивление его более чем в 2 раза выше, чем у константана, а рабочая температура достигает 850 °С.

Для резисторов с высокой стабильностью сопротивления применяется манганин с рабочей температурой не более 60 °С.

в) **Конструкция резисторов.** Резисторы в виде спирали из проволоки или ленты изготавливаются путем ее навивки на цилиндрическую оправку «виток к витку». Необходимый зазор между витками устанавливается при растяжении спирали и креплении ее к опорным изоляторам в виде фарфоровых роликов. Недостатком такой конструкции является малая жесткость, из-за которой возможно соприкосновение соседних витков, что требует снижения рабочей температуры материала (100 °С для константановой спирали). Поскольку теплоемкость такого резистора определяется только массой резистивного материала, постоянная времени нагрева таких резисторов мала.

Резисторы в виде спирали целесообразно использовать для длительного режима работы, так как тепло рассеивается всей поверхностью проволоки или ленты [удельный коэффициент теплоотдачи до 20 Вт/(м^2·°С)].

Допустимый ток спирали из константана, А, составляет для круглой проволоки $I_{доп}=3{,}21\,d\sqrt{d}$, для плоской ленты $I_{доп}=2{,}89h\sqrt{b}$.

Постоянные времени нагрева, с, для этих спиралей составляют для круглой проволоки $T=44{,}5\,d$ и для плоской ленты $T=89\,b$. В приведенных соотношениях d — диаметр круглой проволоки, мм; h и b — высота и толщина ленты, мм.

Для увеличения жесткости спирали проволока может наматываться на керамический каркас в виде трубки (рис. 7.13) со спиральным пазом на поверхности, предотвращающим замыкание витков между собой. Такая конструкция позволяет повысить рабочую температуру резистора из константана до 500 °С. В процессе нагрева и охлаждения участвует как проволока, так и каркас. Постоянная времени, с, нагрева такого элемента

$$T=\frac{\beta_к G_к+G_{пр}}{k_т S},$$

где $G_к$ — масса каркаса, кг; $G_{пр}$ — масса проволоки, кг; S — поверхность охлаждения, м^2.

Коэффициент $\beta_к$ учитывает, что в переходном режиме теплоемкость

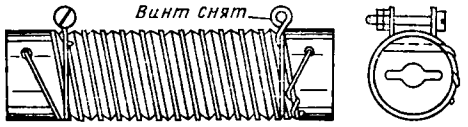


Рис. 7.13. Резистор на керамическом каркасе

каркаса не используется полностью. Чем быстрей идет процесс нагрева во времени, тем меньше коэффициент $\beta_к$. В кратковременных режимах работы $\beta_к$ падает до 0,3—0,4. За поверхность охлаждения резистора S принимается цилиндрическая поверхность каркаса без учета пазов. Коэффициент теплоотдачи $k_т=21\div23$ Вт/(м²·°С). Даже при кратковременном режиме работы каркас более чем в 2 раза увеличивает постоянную времени нагрева за счет своей большой массы.

При $d<0{,}3$ мм пазы на поверхности каркаса не делаются и изоляция между витками создается за счет окалины (пленки оксидов), образующейся при нагреве проволоки. Для предохранения от механических повреждений провод покрывается жаростойкой стеклоэмалью. Такие трубчатые резисторы широко применяются для управления двигателями малой мощности, в качестве разрядных, дополнительных сопротивлений в цепях автоматики и др. Максимальная мощность, при которой их температура не превышает предельно допустимую, составляет 150 Вт, а постоянная времени нагрева 200—300 с. Из-за технологической сложности изготовления больших каркасов эти резисторы не применяются при больших мощностях.

Для пуска двигателей мощностью до 10 кВт широко применяются так называемые проволочные или ленточные поля (рис. 7.14), иногда называемые рамочными резисторами. На стальной пластине *1* укреплены изоляторы *2* из фарфора или стеатита. Константановая проволока *3* наматывается в канавки на поверхности изоляторов. Для резисторов на большие токи используется лента. Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности проволоки, составляет всего 10—14 Вт/(м²·°С). Поэтому условия охлаждения такого резистора хуже, чем при свободной спирали. Из-за малой массы изоляторов и слабого теплового контакта проволоки с металлической пластиной постоянная времени нагрева рамочного резистора примерно такая же, как и при отсутствии каркаса. Максимальная допустимая температура равна 300 °С.

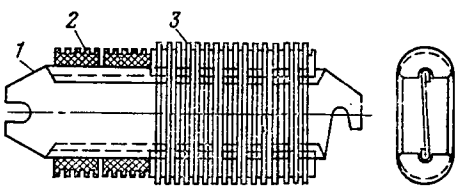


Рис. 7.14. Рамочный резистор

Рассеиваемая мощность достигает 350 Вт. Обычно несколько резисторов такого типа компонуются в одном блоке.

Для двигателей мощностью от трех до нескольких тысяч киловатт применяются высокотемпературные резисторы на основе жаростойких сплавов 0Х23Ю5 (рис. 7.15). С целью уменьшения габаритных размеров и получения необходимой жесткости жаростойкая лента наматывается на ребро и укладывается в канавки, фиксирующие положение отдельных витков. В одном блоке устанавливается пять резисторов мощностью 450 Вт каждый, которые при больших токах могут быть соединены параллельно.

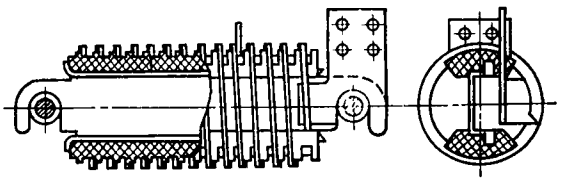


Рис. 7.15. Высокотемпературный резистор

Жаростойкие резисторы имеют малый ТКС и большую механическую жесткость, благодаря чему широко применяются в аппаратах, подвергающихся интенсивным механическим воздействиям. Эти резисторы обладают высокой термической устойчивостью. Допускается кратковременный нагрев до 850 °С при длительной допустимой температуре 300 °С.

Чугунные резисторы (рис. 7.16) широко применяются для двигателей мощностью от трех до нескольких тысяч киловатт.

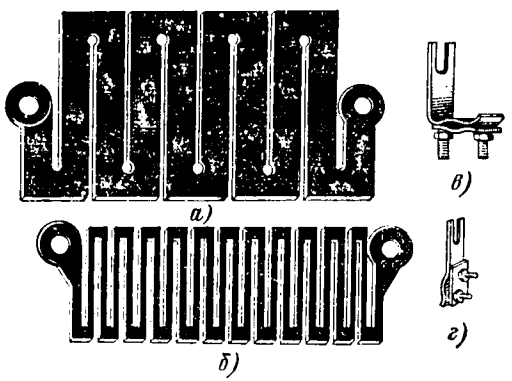


Рис. 7.16. Чугунные резисторы:
а — для больших токов; *б* — для малых токов; *в* и *г* — выводные зажимы

При максимальной рабочей температуре чугуна 400 °С номинальная мощность резисторов принимается из расчета на температуру 300 °С. Сопротивление чугунных резисторов в значительной степени зависит от температуры, поэтому они применяются только как пусковые. Набор чугунных резисторов собирают в стандартные ящики с помощью стальных стержней, изолированных от чугуна миканитом (рис. 7.17). Если у резистора необходимо сделать отводы, то они делаются с помощью специальных зажимов (рис. 7.16, *в*, *г*), которые устанавливаются между соседними резисторами, соединенными последовательно.

Общая мощность резисторов, установленных в одном ящике, не должна превосходить 4,5 кВт. При монтаже ящики резисторов монтируются друг на друге. При этом воздух, нагретый в нижних ящиках,

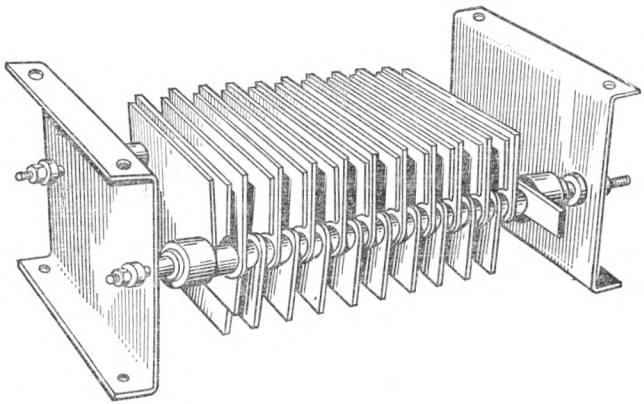


Рис. 7.17. Ящик чугунных резисторов

омывает верхние, ухудшая охлаждение последних. Из этих соображений при вертикальном монтаже более трех ящиков между ними необходим зазор не менее $80 \cdot 10^{-3}$ м.

Для ответственных электроприводов целесообразно реостат собирать из стандартных ящиков (без отводов внутри ящика). При повреждении резистора в ящике работоспособность схемы быстро восстанавливается путем замены неисправного ящика на новый.

Поскольку температура воздуха вблизи резистора высока, токоподводящие провода и шины должны либо иметь достаточно теплостойкую изоляцию, либо вообще не иметь изоляции.

г) Выбор резисторов и схемы их соединения. Сопротивление пускового резистора выбирается так, чтобы броски пускового тока были ограничены и были не опасны для

двигателя (трансформатора) и питающей сети. С другой стороны, значение этого сопротивления должно обеспечить пуск двигателя за требуемое время. Подробнее этот вопрос рассмотрен в [7.1].

После расчета сопротивления производятся расчет и выбор резистора по нагреву. Температура резистора в любых режимах не должна превышать допустимую для данной конструкции.

В процессе пуска двигателя ток в резисторе меняется во времени. Если длительность обтекания резистора током мала по сравнению с его постоянной времени T, то расчет можно вести по эквивалентному току $I_{эк,т}$, тепловой эффект которого за время работы такой же, как и реального тока (эквивалентный ток по теплу):

$$I_{эк,т} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_р} i^2\,dt}{t_р}}, \qquad (7.1)$$

где $t_р$ — время прохождения пускового тока по резистору.

В этом случае теплоотдачей резистора можно пренебречь. Температура его нагрева от реального тока и тока $I_{эк,т}$ будет одинакова.

Для определения тока $I_{эк,т}$ можно воспользоваться реальной кривой тока, построить зависимость $i^2(t)$ и провести графическое интегрирование. Достаточно точный для практики результат можно получить, заменяя кривые спада пускового тока отрезками прямых [7.1].

Наряду с эквивалентным током по теплу $I_{эк,т}$ существует эквивалентный ток по нагреву $I_{эк,н}$ — ток, который, проходя по сопротивлению, нагревает его до той же температуры, что и реальный ток. При сделанном допущении $t_р \ll T$ эквивалентный ток по теплу равен эквивалентному току по нагреву:

$$I_{эк,т} = I_{эк,н}.$$

Нагрев резистора происходит без отдачи тепла в окружающую среду.

По значениям $I_{эк,т}$ и $I_{эк,н}$ можно выбрать резистор необходимого типа, если в справочнике приведен ток кратковременного режима для заданного времени $t_р$.

Обычно в справочниках задан длительный допустимый ток нагрузки. В этом случае необходимо перейти к эквивалентному длительному току, который нагревает резистор до той же температуры, что и пуско-

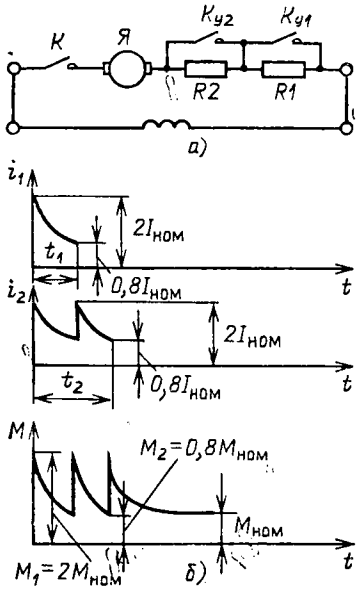


Рис. 7.18. Схема пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением:

а — схема включения; *б* — изменение токов в якоре i_1 и i_2 и вращающего момента M в функции времени

вой. Ниже приводится поверочный расчет резистора, предназначенного для пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением [7.1]. Пуск производится раз в смену. Номинальный ток двигателя 120 А. Принципиальная схема пуска двигателя приведена на рис. 7.18, *а*. После включения контактора K по цепи течет пусковой ток, определяемый уравнением

$$i = \frac{U - e}{\Sigma R},$$

где U — напряжение сети; e — противо-ЭДС двигателя, пропорциональная частоте вращения якоря; ΣR — суммарное сопротивление цепи якоря, состоящее из сопротивления обмотки якоря $R_я$ и сопротивлений пусковых резисторов $R1$ и $R2$. Изменение пускового тока показано на рис. 7.18, *б*. Здесь t_1 — момент включения контактора $K_{у1}$; t_2 — момент включения контактора $K_{у2}$. Момент M, развиваемый двигателем, пропорционален току якоря i. Момент M_1 соответствует току $i_1 = 2I_{ном}$, момент M_2 — току $i_2 = 0{,}8\ I_{ном}$. Через резистор $R1$ ток протекает в течение времени $t_1 = 1{,}35$ с, через резистор $R2$ — в течение $t_2 = 1{,}35 + 0{,}54 = 1{,}9$ с. Времена t_1 и t_2 определяются при расчете динамики двигателя [7.1].

Выбран резистор на длительный ток 33 А с постоянной времени $T = 250$ с. Поскольку t_1 и t_2 значительно меньше T, то эквивалентный ток по теплу $I_{эк,т}$ равен эквивалентному току по нагреву $I_{эк,н}$. Согласно [7.1] для первой ступени

$$I_{р1} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}} = I_{эк,т} = I_{эк,н};$$

$I_1 = 2I_{ном} = 240$ А; $I_2 = 0{,}8I_{ном} = 96$ А; $I_{р1} = 173{,}5$ А.

Так как пусковой резистор должен допускать трехкратный пуск, то для резистора $R1$.

$$t_{р1} = 3t_1 = 3 \cdot 1{,}35 = 4{,}05 \text{ с}.$$

Воспользовавшись для кратковременного режима кривой на рис. 2.13 для $t_{р1}/T=4{,}05/250=0{,}015$, находим эквивалентный длительный ток $I_{эк,дл}$ резистора *R1*:

$$I_{эк,дл}=0{,}13I_{р1}=22{,}6\ A.$$

Для резистора *R2*

$$t_{р2}=3t_2=3\cdot 1{,}9=5{,}7\ с.$$

Согласно [7.1] эквивалентный ток для резистора *R2*

$$I_{р2}=\sqrt{\frac{\left(I_1^2+I_2^2+I_1I_2\right)t_1+\left(I_1^2+I_2^2+I_1I_2\right)t_2}{3(t_1+t_2)}}=$$

$$=\sqrt{\frac{I_1^2+I_2^2+I_1I_2}{3}}=I_{р1}.$$

Таким образом, эквивалентный ток резисторов *R2* и *R1* одинаков. Учитывая длительность обтекания током резистора *R2* ($t_{р2}=5{,}7$ с) с помощью кривой рис. 2.13, находим эквивалентный длительный ток $I_{эк,дл}=26$ А для $t_{р2}/T=0{,}023$. Так как длительный ток резистора 33 А, то резистор проходит по нагреву.

При расчете для самого общего случая — перемежающегося режима (§ 2.5), если время цикла $t_{р1}+t_{р2}$ мало по сравнению с постоянной времени T, (7.1) можно упростить:

$$I_{эк,н}=I_{эк,т}=\sqrt{\frac{I_{р1}^2t_{р1}+I_{р2}^2t_{р2}}{t_{р1}+t_{р2}}}. \qquad (7.2)$$

Выражение (7.2) не требует знания постоянной времени T, оно проще (7.1) и может быть рекомендовано для предварительных расчетов.

Для повторно-кратковременного режима работы $I_{р1}=I_р=\text{const}$; $I_{р2}=0$. В этом случае согласно § 2.5 для любого значения $t_р/T$ имеем

$$I_{эк,п}=I_р\sqrt{\frac{1-e^{-t_р/T}}{1-e^{-t_р/T\cdot ПВ}}}. \qquad (7.3)$$

Если $t_р/T\ll 1$, то формула (7.3) может быть упрощена:

$$I_{эк,п}=I_р\sqrt{ПВ}. \qquad (7.4)$$

Эквивалентный по теплу ток $I_{р,ц}$ за время цикла $t_р+t_п$

можно найти из равенства

$$I_{\text{р}}^2 t_{\text{р}} = I_{\text{р,ц}}^2 (t_{\text{р}} + t_{\text{п}});$$

$$I_{\text{р,ц}} = I_{\text{р}} \sqrt{\frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_{\text{п}}}} = I_{\text{р}} \sqrt{\text{ПВ}}. \qquad (7.5)$$

Из (7.4) и (7.5) следует

$$I_{\text{эк,в}} = I_{\text{р,ц}}.$$

Таким образом, при сделанных допущениях эквивалентный по нагреву длительный ток равен току, эквивалентному по теплу за время одного цикла.

Тепловой расчет резисторов весьма сложен. Для типовых схем пусковые резисторы выбираются по справочным таблицам, в которых сопротивления и токи даны в зависимости от параметров двигателя.

При компоновке реостата отдельные резисторы и ящики резисторов должны возможно полнее использоваться по нагреву, что позволяет уменьшить габариты аппарата. Для полного использования последовательно включенных резисторов все они должны быть рассчитаны на один и тот же длительный ток.

В пусковых реостатах крупных двигателей резисторы часто включаются параллельно. В этом случае падения напряжения на всех резисторах одинаковы и для их полного использования по нагреву произведение длительно допустимого тока на сопротивление для всех резисторов должно быть одинаковым.

Если один из резисторов, например R_a, имеет меньшее значение $i_a R_a$, чем у остальных резисторов, то при номинальной нагрузке этого резистора все остальные резисторы будут недогружены по мощности.

7.5. РЕОСТАТЫ

а) **Классификация реостатов и требования к ним.** В соответствии с назначением резисторов (§ 7.4) реостаты делятся на пусковые, пускорегулирующие, регулировочные, нагрузочные и возбуждения.

Пусковые реостаты и пусковая часть пускорегулирующего реостата для уменьшения габаритов должны иметь большую постоянную времени. Эти реостаты предназначены для работы в кратковременном режиме, и требования повышенной стабильности сопротивления к ним не предъявляются. Согласно существующим нормам пусковой реостат нагревается до предельной температуры после трех пусков

с интервалами между пусками, равными двойному времени пуска.

Ко всем остальным реостатам предъявляются требования стабильности сопротивления и они рассчитаны на работу в длительном режиме. В электроприводе наиболее распространены реостаты с переключаемыми металлическими резисторами. Для переключения используются плоские, барабанные и кулачковые контроллеры (при больших мощностях).

По виду теплоотвода реостаты могут быть с естественным воздушным или масляным охлаждением, с принудительным воздушным, масляным или водяным охлаждением.

б) **Конструкция реостатов с естественным воздушным охлаждением.** В этих реостатах переключающее устройство и резисторы располагаются так, чтобы конвективные потоки воздуха, перемещаясь снизу вверх, охлаждали резисторы. Кожухи, закрывающие реостат, не должны препятствовать циркуляции охлаждающего воздуха. Максимальная температура кожуха не должна превышать 160 °С. Температура контактов переключающего устройства должна быть не выше 110 °С.

В таких реостатах применяются резисторы всех типов. При небольшой мощности резисторы и контроллер компонуются в один аппарат. При больших мощностях контроллер является самостоятельным аппаратом.

Для пуска двигателей постоянного тока с шунтовым и компаундным возбуждением при мощности до 42 кВт применяются реостаты серий РП и РЗП. Эти реостаты помимо резисторов и контроллера содержат включающий контактор, используемый для защиты от понижения напряжения, и максимальное реле для защиты от перегрузок по току. Резисторы выполняются на фарфоровых каркасах или в виде рамочных элементов. Переключающее устройство выполнено в виде плоского контроллера с самоустанавливающимся мостиковым контактом. Контроллер, малогабаритный контактор КМ и максимальное реле мгновенного действия *КА* установлены на общей панели. Узлы реостата смонтированы на стальном основании. Кожух защищает реостат от попадания капель воды, но не препятствует свободному протоку воздуха.

Электрическая схема включения одного из таких типов реостата показана на рис. 7.19. При пуске двигателя шунтовая обмотка возбуждения *Ш1*, *Ш2* присоединяется к сети, а в цепь якоря вводится пусковой резистор, сопротивление которого с помощью контроллера уменьшается по мере увеличения частоты вращения двигателя. Подвижный мостиковый контакт *16* замыкает неподвижные контакты *0—13* с токосъемными шинами *14*, *15*, соединенными с цепями обмоток двигателя.

В положении *0* контакта *16* обмотка контактора *КМ* закорочена,

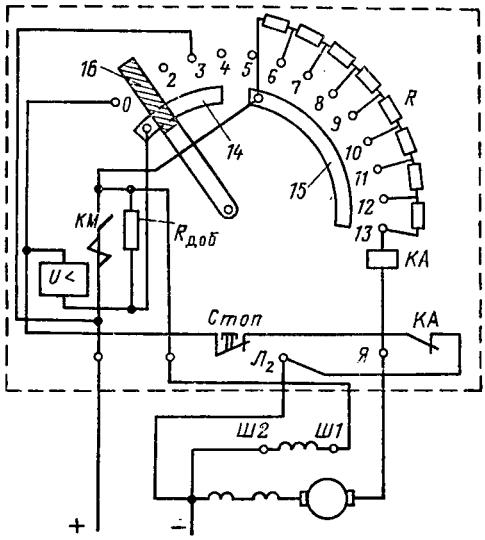


Рис. 7.19. Схема включения пускового реостата

контактор отключен и напряжение с двигателя снято. В положении *3* на обмотку *КМ* подается напряжение источника питания, контактор срабатывает и замыкает свои контакты. При этом на обмотку возбуждения подается полное напряжение, а в цепь якоря включены все пусковые резисторы реостата. В положении *13* пусковое сопротивление полностью выведено. В положении *5* подвижного контакта *16* питание обмотки контактора *КМ* происходит через резистор $R_{доб}$ и замкнутый контакт *КМ*. При этом уменьшается мощность, потребляемая *КМ*, и повышается напряжение отпускания. В случае снижения напряжения на 20—25 % ниже номинального контактор *КМ* отпадает и отключает двигатель от сети, осуществляя защиту от недопустимого падения напряжения на двигателе.

В случае токовой перегрузки двигателя (1,5÷3) $I_{ном}$ срабатывает максимальное реле *КА*, которое разрывает цепь обмотки *КМ*. При этом контактор *КМ* отключается и обесточивает двигатель. После отключения двигателя контакты *КА* снова замкнутся, однако контактор *КМ* не включится, так как после отключения *КМ* цепь его обмотки осталась разомкнутой. Для повторного пуска необходимо установить контакт *16* контроллера в положение *0* или хотя бы во второе положение.

Для отключения двигателя контакт *16* устанавливается в *0*.

При снижении напряжения сети до напряжения отпускания контактора его якорь отпадает и происходит отключение двигателя от сети. Таким образом, осуществляется минимальная защита двигателя. Контакты *1*, *2*, *4*, *5* не используются, что предохраняет контроллер от возникновения между контактами электрической дуги с большим током. Описанная схема обеспечивает дистанционное отключение двигателя с помощью кнопки «Стоп» с размыкающим контактом.

Для выбора пускового реостата необходимо знать мощность дви-

гателя, условия пуска и характер изменения нагрузки при пуске, а также напряжение питания двигателя.

в) **Масляные реостаты.** В таких реостатах металлические элементы резисторов и контроллер располагаются в трансформаторном масле, которое обладает значительно большей теплопроводностью и теплоемкостью, чем воздух. Благодаря этому масло более эффективно отводит тепло от нагретых металлических деталей. За счет большого количества масла, участвующего в нагреве, постоянная времени нагрева реостата резко возрастает, что позволяет создать пусковые реостаты малых габаритов на большую мощность нагрузки.

Для предотвращения местных перегревов в резисторах и улучшения их теплового контакта с маслом в реостатах применяются резисторы в виде свободной спирали, проволочные и ленточные поля, зигзагообразные из электротехнической стали и чугуна.

При температурах ниже 0 °С охлаждающая способность масла из-за повышения его вязкости резко ухудшается. Поэтому масляные реостаты не применяются при отрицательных температурах окружающей среды.

Поверхность охлаждения масляного реостата определяется в основном цилиндрической поверхностью кожуха. Эта поверхность меньше поверхности охлаждения проволоки резисторов, поэтому применение масляных реостатов в длительном режиме нецелесообразно. Малая допустимая температура нагрева масла также ограничивает мощность, которую может рассеять реостат.

После трехкратного пуска двигателя пусковой реостат должен охладиться до температуры окружающей среды. Так как этот процесс длится около 1 ч, масляные пусковые реостаты используются для редких пусков.

Наличие масла резко уменьшает коэффициент трения между контактами переключающего контроллера. При этом уменьшаются износ контактов и необходимый момент на рукоятке управления.

Малые силы трения позволяют увеличить контактное нажатие и в 3—4 раза увеличить токовую нагрузку контактов. Это дает возможность резко снизить габариты переключающего устройства и всего реостата в целом. Кроме того, наличие масла улучшает условия гашения дуги между контактами переключающего устройства. Однако масло играет и отрицательную роль в работе контактов. Продукты разложения масла, оседая на поверхности контактов, увеличивают переходное сопротивление и, следовательно, температуру самих контактов. В результате процесс разложения масла будет идти более интенсивно. Контакты рассчитываются так, чтобы температура их не превышала 125 °С. Продукты разложения масла осаждаются и на поверхности резисторов, ухудшая тепловой контакт проводников с маслом. Поэтому максимально допустимая температура трансформаторного масла не превышает 115 °С.

Масляные реостаты широко применяются для пуска трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. При мощностях двигателей до 50 кВт используются плоские контроллеры с круговым движением подвижного контакта (рис. 7.19). При больших мощностях применяется барабанный контроллер.

Реостаты могут иметь блок-контакты для сигнализации о состоянии аппарата и блокировки с контактором в цепи обмотки статора двигателя. Если максимальное сопротивление реостата еще не включено, обмотка включающего контактора разомкнута и напряжение на обмотку статора не поступает.

В конце пуска двигателя реостат должен быть полностью выведен, а ротор закорочен, так как элементы рассчитаны на кратковременный режим работы. Чем больше мощность двигателя, тем дольше время его разгона и тем большее число ступеней должен иметь реостат.

Для выбора реостата необходимо знать номинальную мощность двигателя $P_{ном}$, напряжение $U_р$ на заторможенном роторе при номинальном напряжении на статоре, номинальный ток ротора $I_{ном,р}$ и уровень нагрузки двигателя при пуске. По этим параметрам можно выбрать реостат с помощью справочников [7.1].

Недостатками масляного реостата являются малая допустимая частота пусков из-за медленного охлаждения масла, загрязнение помещения брызгами и парами масла, возможность воспламенения масла.

Глава восьмая

КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Контактор представляет собой электрический аппарат, предназначенный для коммутации силовых электрических цепей. Замыкание или размыкание контактов контактора осуществляется чаще всего под воздействием электромагнитного привода.

Контакторы постоянного тока предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие электромагнитом постоянного тока.

Контакторы переменного тока предназначены для коммутации цепей переменного тока. Электромагниты этих контакторов могут быть как переменного, так и постоянного тока.

В настоящее время частота коммутаций в схемах электропривода достигает 3600 в час. Этот режим работы яв-

ляется наиболее тяжелым. При каждом включении и отключении происходит износ контактов (§ 3.2). Поэтому принимаются меры к сокращению длительности горения дуги при отключении и к устранению вибраций контактов.

Общие технические требования к контакторам и условия их работы регламентированы ГОСТ 11206—77. Ниже описываются категории применения современных контакторов и приводятся параметры коммутируемых ими цепей в зависимости от характера нагрузки.

а) Контакторы переменного тока (табл. 8.1)

АС-1 — активная или малоиндуктивная нагрузка.

АС-2 — пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением.

АС-3 — пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке.

АС-4 — пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей. Торможение противовключением.

б) Контакторы постоянного тока (табл. 8.2)

ДС-1 — активная или малоиндуктивная нагрузка.

ДС-2 — пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения.

ДС-3 — пуск электродвигателей с параллельным возбуждением и их отключение при неподвижном состоянии или медленном вращении ротора.

ДС-4 — пуск электродвигателей с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения.

ДС-5 — пуск электродвигателей с последовательным возбуждением, отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей, торможение противотоком.

Для контакторов существует еще режим редких коммутаций, характеризуемый более тяжелыми условиями, чем при нормальных коммутациях [ток включения достигает $10\,I_{ном}$]. Такие режимы возникают довольно редко (например при КЗ). Основными техническими данными контакторов являются номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение коммутируемой цепи, механическая и коммутационная износостойкость, допустимое число включений в час,

Таблица 8.1 **Контакторы переменного тока**

Категория применения	Режим нормальных коммутаций					
	Включение			Отключение		
	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	cos φ	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	cos φ
АС-1	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,95	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,95
АС-2	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,65	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,65
АС-3	$6\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,35	$I_{ном,р}$	$0,17\,U_{ном,р}$	0,35
АС-4	$6\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,35	$6\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,35

Таблица 8.2. **Контакторы постоянного тока**

Категория применения	Режим нормальных коммутаций					
	Включение			Отключение		
	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	Постоянная времени, мс	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	Постоянная времени, мс
ДС-1	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	1	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	1
ДС-2	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	2	$2,5\,I_{ном,р}$	$0,1\,U_{ном,р}$	7,5
ДС-3	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	2	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	2
ДС-4	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	7,5	$I_{ном,р}$	$0,3\,U_{ном,р}$	10
ДС-5	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	7,5	$2,5\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	7,5

собственное время включения и отключения. Способность контактора, как и любого коммутационного аппарата, обеспечить работу при большом числе операций характеризуется износостойкостью. Различают механическую и коммутационную износостойкость. Механическая износостойкость определяется числом циклов включение-отключение контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при этом равен нулю. Механическая износостойкость современных контакторов составляет $(10 \div 20) \cdot 10^6$ операций.

Коммутационная износостойкость определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка $(2 \div 3) \cdot 10^6$ операций (некоторые выпускаемые в настоящее время контакторы имеют коммутационную износостойкость 10^6 операций и менее).

Собственное время включения состоит из времени нара-

Режим редких коммутаций					
Включение			Отключение		
Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	cos φ	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	cos φ
$1{,}5\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,95	$1{,}5\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном\,р}$	0,95
$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,65	$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,65
$10\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,35	$8\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,35
$10\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,35	$8\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	0,35

Режим редких коммутаций					
Включение			Отключение		
Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	Постоянная времени, мс	Коммутируемый ток, А	Напряжение, В	Постоянная времени, мс
—	—	—	—	—	—
$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	2,5	$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	2,5
$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	2,5	$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	2,5
$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	15	$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	15
$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	15	$4\,I_{ном,р}$	$1{,}1\,U_{ном,р}$	15

стания потока в электромагните контактора до значения потока трогания и времени движения якоря. Большая часть этого времени тратится на нарастание магнитного потока. Для контакторов постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время включения составляет 0,14 с, для контакторов с током 630 А оно увеличивается до 0,37 с.

Собственное время отключения — время с момента обесточивания электромагнита контактора до момента размыкания его контактов. Оно определяется временем спада потока от установившегося значения до потока отпускания. Временем с начала движения якоря до момента размыкания контактов можно пренебречь. В контакторах постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время отключения составляет 0,07, в контакторах с номинальным током 630 А — 0,23 с.

Номинальный ток контактора $I_{ном}$ представляет собой ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течение 8 ч без коммутаций, причем превыше-

Таблица 8.3. Характеристика нагрузки вспомогательных контактов

Род тока	Категория применения	Коммутационная способность					
		в режиме нормальных коммутаций					
		Включение			Отключение		
		Коммутируемый ток	Напряжение	cos φ	Коммутируемый ток	Напряжение	cos φ
Переменный	АС-11	$10\,I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,7	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	0,4
Постоянный	ДС-11	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	—	$I_{ном,р}$	$U_{ном,р}$	—

Примечание. Постоянную времени согласно СТ СЭВ 3564-82 выражают чения установившегося тока в миллисекундах, и определяют по эмпирической если мощность превышает 50 Вт, принимается $T_{0,95}$ =300 мс.

ние температуры различных частей контактора не должно быть больше допустимого (прерывисто-продолжительный режим работы). Номинальный рабочий ток контактора $I_{ном,р}$ — это допустимый ток через его замкнутые главные контакты в конкретных условиях применения. Так, например, номинальный рабочий ток $I_{ном,р}$ контактора для коммутации асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выбирается из условий включения шестикратного пускового тока двигателя.

Номинальным напряжением называется наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор. Коммутационная износостойкость главных контактов для категорий ДС-2, ДС-4 и АС-3 в режиме нормальных коммутаций должна быть не менее 0,1, а для категорий ДС-3 и АС-4 не менее 0,02 механической износостойкости. Вспомогательные контакты должны коммутировать цепи электромагнитов переменного тока, у которых пусковой ток может во много раз превышать установившийся. Характеристика категорий применения для этих контактов приведена в табл. 8.3.

Контактор имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, электромагнит и систему вспомогательных контактов. При подаче напряжения на обмотку электромагнита контактора его якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем электромагнита, замыкает или размыкает главную цепь. Дугогасительное устройство обеспечивает быстрое гашение

при коммутации обмоток электромагнитов

вспомогательных контактов

в режиме редких коммутаций					
Включение			Отключение		
Коммутируемый ток	Напряжение	cos φ	Коммутируемый ток	Напряжение	cos φ
11 $I_{ном.р}$	1,1 $U_{ном.р}$	0,7	11 $I_{ном.р}$	1,1 $U_{ном.р}$	0,7
1,1 $I_{ном.р}$	1,1 $U_{ном.р}$	—	1,1 $I_{ном.р}$	1,1 $U_{ном.р}$	—

как $T_{0,95}$, что соответствует времени, необходимому для достижения 0,95 зна- формуле $T_{0,95} = 6P$, где P — мощность электромагнита не более 50 Вт. В случае,

дуги, благодаря чему достигается малый износ контактов. Система вспомогательных слаботочных контактов служит для согласования работы контактора с другими устройствами.

8.2. КОНТАКТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) **Контактная система.** С целью уменьшения износа для контакторов применяются преимущественно линейные перекатывающиеся контакты (§ 3.4). Для предотвращения вибраций контактов контактная пружина создает предварительное нажатие, составляющее примерно 50 % конечного контактного нажатия. Большое влияние на вибрацию оказывает жесткость крепления неподвижного контакта и стойкость к вибрациям всего контактора в целом. На рис. 8.1 показана конструкция контактора серии КПВ-600. Неподвижный контакт *1* жестко прикреплен к скобе *2*, к которой присоединен один конец дугогасительной катушки *3*. Второй конец дугогасительной катушки с выводом *4* закреплен в пластмассовом основании *5*. Последнее крепится к прочной стальной скобе *6*. Подвижный контакт *7* выполнен в виде толстой пластины, нижний конец которой может поворачиваться относительно точки опоры *8*. Благодаря этому контакт *7* может перекатываться и скользить по поверхности неподвижного контакта *1*. Вывод *9* соединяется с подвижным контактом *7* гибкой связью *10*. Контактное нажатие создается пружиной *12*.

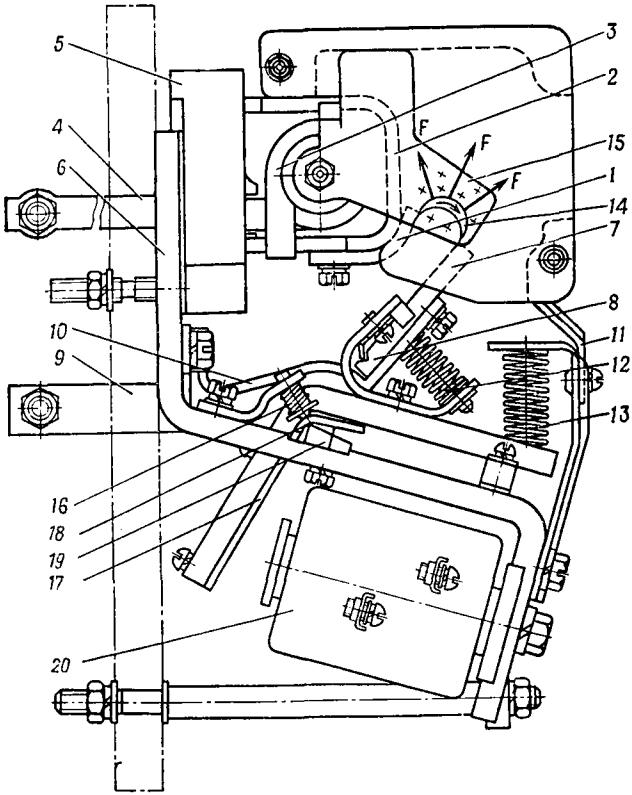


Рис. 8.1. Контактор постоянного тока серии КПВ-600

При износе контакт *1* заменяется новым, а пластина подвижного контакта переворачивается на 180° и используется ее неповрежденная сторона.

Для уменьшения оплавления контактов дугой при токах более 50 А контактор имеет дугогасительные контакты — рога *2*, *11*. Под действием магнитного поля опорные точки дуги *14* быстро перемещаются на скобу *2*, соединенную с неподвижным контактом *1*, и на защитный рог подвижного контакта *11*. Возврат якоря в начальное положение (после отключения электромагнита) производится пружиной *13*.

В контакторах КПВ-600, как и во многих других, вывод подвижного контакта электрически соединен с корпусом. Как при включенном, так и при отключенном состоянии

контактора его конструктивные детали могут находиться под напряжением, и соприкосновение с ними опасно для жизни. Контакторы серии КПВ имеют два исполнения контактной системы: с замыкающим и размыкающим главными контактами. В первом исполнении замыкание главных контактов производится при подаче напряжения на обмотку электромагнита, а размыкание — под действием возвратной пружины. Во втором исполнении контакты замыкаются под действием пружины, а размыкание контактов происходит при подаче напряжения на обмотку электромагнита. В обесточенном состоянии обмотки контакты замкнуты. При номинальном токе контактор находится во включенном состоянии не более 8 ч. По истечении этого времени его необходимо несколько раз отключить и включить для зачистки контактов от оксида меди. После этого аппарат снова пригоден для работы.

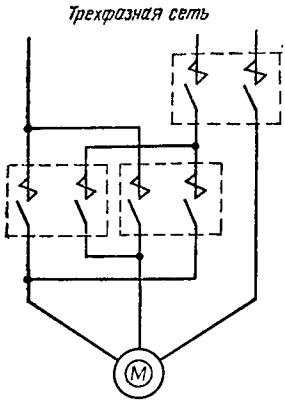
Номинальный ток контакторов, расположенных в шкафах, понижается примерно на 10 % из-за ухудшения охлаждения.

В продолжительном режиме работы, когда длительность нахождения во включенном состоянии превышает 8 ч, допустимый ток контактора снижается примерно на 20 %. В таком режиме из-за окисления меди контактов растет их переходное сопротивление, что может привести к повышению температуры выше допустимой (§ 3.2). В контакторах с небольшим числом включений или предназначенных для длительного нахождения во включенном состоянии, на рабочую поверхность контактов напаивается серебряная пластина. Это позволяет сохранить допустимый ток контактора, равный номинальному, и в режиме продолжительного включения. Если контактор наряду с режимом продолжительного включения используется в режиме повторно-кратковременного включения, применение серебряных накладок нецелесообразно из-за малой механической прочности серебра.

Необходимо отметить, что если при отключении в повторно-кратковременном режиме длительно горит дуга (отключается нагрузка с большой постоянной времени $T = L/R$), то температура контактов может резко увеличиться за счет их нагрева дугой. В этом случае нагрев контактов в продолжительном режиме работы может быть меньше, чем в повторно-кратковременном режиме.

Как правило, контактная система имеет один полюс.

Для реверса асинхронных двигателей при большой ча-



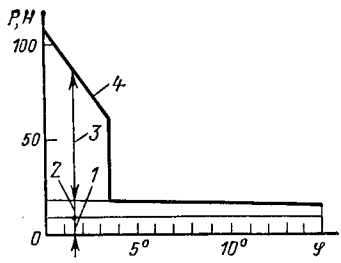


Рис. 8.3. Характеристика противодействующих усилий контактора КПВ-600

← Рис. 8.2. Схема включения главных контактов контактора КТПВ-600 для реверса асинхронного двигателя

стоте включений в час (до 1200) применяются контакторы типа КТПВ-600 со сдвоенными полюсами. В этих контакторах подвижные контакты изолированы от корпуса, что делает более безопасным обслуживание аппарата. На рис. 8.2 показана схема включения главных контактов контактора КТПВ-600 (обведены штриховой линией) для реверса асинхронного двигателя. Для пуска, останова и реверса двигателя используются три контактора такого же типа.

При неполадках и отказе одного контактора подается напряжение только на одну фазу двигателя, что не приводит к его включению. В схеме с однополюсными контакторами отказ одного контактора привел бы к возникновению тяжелого режима двухфазного питания двигателя.

Контакторы с двухполюсной контактной системой очень удобны для закорачивания сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя.

В контакторах типа КМВ-521, предназначенных для включения и отключения мощных электромагнитов постоянного тока масляных выключателей, также применяется двухполюсная контактная система. Такая система, включенная в оба провода сети постоянного тока, обеспечивает надежное отключение индуктивной нагрузки, так как в отключаемую цепь вводятся два дуговых промежутка.

б) **Дугогасительное устройство.** В контакторах постоянного тока наибольшее распространение получили устройства с электромагнитным дутьем с катушкой тока *3* и полюсами *15* (см. рис. 8.1).

Следует отметить, что при отключении малых постоян-

ных токов (5—10 А) и большой индуктивности нагрузки наблюдается длительное горение дуги. По опытным данным ток, надежно отключаемый контактором, составляет 20—25 % номинального тока. Современные контакторы серии МК обеспечивают отключение тока до 1 А при постоянной времени цепи до 100 мс.

в) **Электромагнит.** В контакторах постоянного тока (рис. 8.1) распространены электромагниты клапанного типа *20*. С целью повышения механической износостойкости применяется вращение якоря *17* на призме *19*. Компоновка электромагнита и контактной системы, показанная на рис. 8.1, применение специальной пружины *16*, прижимающей якорь к призме, позволяют обеспечить износостойкость узла вращения у контакторов КПВ-600 до $20 \cdot 10^6$ при допустимом числе включений 1200 в час. По мере износа зазор между скобой якоря *18* и призмой *19* автоматически выбирается под воздействием пружины *16*.

Подвижная система контактора должна быть уравновешена относительно оси вращения. В контакторе серии КПВ-600 якорь электромагнита уравновешивается деталями, несущими подвижный контакт и воспринимающими воздействие возвратной пружины. Катушка электромагнита наматывается на тонкостенную изолированную стальную гильзу, которая обеспечивает достаточную жесткость и улучшает тепловой контакт катушки с сердечником. Последнее способствует снижению температуры катушки и уменьшению габаритов контактора.

При включении электромагнита преодолеваются усилия возвратной и контактной пружин. Тяговая характеристика электромагнита должна во всех точках идти выше характеристики этих пружин при минимально допустимом напряжении на катушке (0,85 % $U_{ном}$) и нагретом ее состоянии. Включение должно происходить при все время нарастающей скорости движения якоря. Скорость якоря не должна снижаться и в момент замыкания главных контактов.

Характеристика противодействующих усилий, приведенных к якорю электромагнита, для контактора КПВ-600 приведена на рис. 8.3, где φ — угол поворота якоря. Отрезки ординаты этой кривой представляют соответственно: *1* — силу тяжести, *2* — силу возвратной пружины, *3* — силу контактной пружины; *4* — результирующая противодействующая характеристика. Наиболее тяжелым моментом при включении является преодоление силы в момент касания

главных контактов, так как электромагнит должен развивать значительное усилие при большом рабочем зазоре.

Важным параметром контактора является коэффициент возврата $k_в = U_{отп}/U_{ср}$ (§ 9.2). Для контакторов постоянного тока $k_в$, как правило, мал (0,2—0,3), что не позволяет использовать контактор для защиты двигателя от снижения напряжения.

Наибольшее напряжение на катушке не должно превышать 110 % $U_{ном}$, так как при большем напряжении увеличивается износ контактов из-за усиления ударов якоря, а температура обмотки может превысить допустимое значение.

В контакторах типа КТПВ, имеющих сдвоенную контактную систему, при номинальном токе 600 А устанавливаются два параллельно работающих электромагнита для того, чтобы развить необходимую силу.

Следует отметить, что с целью уменьшения МДС обмотки, а следовательно, и потребляемой ею мощности рабочий ход якоря выбирается небольшим — $(8 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м. В связи с тем что для надежного гашения дуги при малых токах требуется зазор контактов $(17 \div 20) \cdot 10^{-3}$ м, расстояние точки касания подвижного контакта от оси вращения подвижной системы берется в 1,5—2 раза больше, чем расстояние от оси полюса до оси вращения.

Электромагниты контакторов серии КМВ, предназначенных для включения и отключения приводов масляных выключателей, допускают регулировку напряжения срабатывания и отпускания за счет регулирования возвратной и специальной отрывной пружин. Минимальное напряжение срабатывания этих контакторов достигает 65 % $U_{ном}$. Низкое напряжение срабатывания приводит к тому, что при номинальном напряжении через обмотку протекает ток, приводящий к ее повышенному нагреву. В связи с этим при номинальном напряжении обмотка может включаться под напряжение только кратковременно на время не более 15 с.

Схема включения электромагнита контактора для пуска двигателя аналогична схеме включения электромагнита пускателя (рис. 8.13).

8.3. КОНТАКТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

а) **Контактная система.** Контакторы переменного тока выпускаются на номинальный ток от 100 до 1000 А при числе главных контактов от одного до пяти. Наиболее распространены контакторы трехполюсного исполнения. Нали-

чие большого числа контактов приводит к увеличению усилия электромагнита и соответственно момента, необходимого для включения контактора.

Так же как и контакторы постоянного тока, контакторы переменного тока имеют вспомогательные контакты, которые приводятся в действие тем же электромагнитом, что и главные контакты.

Из-за более благоприятных условий гашения дуги зазор между главными контактами делается меньше, чем в контакторах постоянного тока. Уменьшение зазора позволяет уменьшить мощность электромагнита, его габариты и массу.

На рис. 8.4, *а* показан разрез по магнитной системе, а на рис. 8.4, *б* — разрез по контактной системе и общий вид одного полюса контактора КТ-6000. Подвижный контакт *1* с пружиной *2* укреплен на рычаге *3*.

Подвижный контакт *1* и якорь *4* электромагнита связаны между собой через вал контактора *6*. В отличие от контакторов постоянного тока подвижный контакт в контакторе КТ-6000 плоский без перекатывания. Отключение аппарата происходит под действием контактных пружин и массы подвижных частей.

Для удобства эксплуатации подвижный и неподвижный контакты сделаны легко сменяемыми. Контактная пружина *2*, так же как и в контакторах постоянного тока, имеет предварительное нажатие, составляющее примерно половину конечного.

Все детали контактора укреплены на изоляционной рейке *5*. Рычаг *3* подвижного контакта *1* укреплен на валу *6*, покрытом изоляционным материалом. Вал вращается в подшипниках *7*. Система дугогашения состоит из последовательной катушки *8*, сердечника *9*, полюсных пластин *10* и керамической камеры *11*. Катушка *8* включена в цепь последовательно с неподвижным контактом *12* и подвижным контактом *1*. Главные контакты подключаются в схему выводами *13* и *14*. Подвижный контакт *1* соединяется с выводом *13* с помощью гибкой связи *15*.

Блок вспомогательных контактов *16* приводится в действие от вала *6*. Крепление всех деталей на рейке позволяет использовать контактор в комплектных станциях реечной конструкции и сократить объем и массу станции управления. Допустимое число включений достигает 1200 в час.

В контакторах переменного тока широко распространена мостиковая контактная система с двумя разрывами цепи на каждый полюс (рис. 3.6), которая обеспечивает быст-

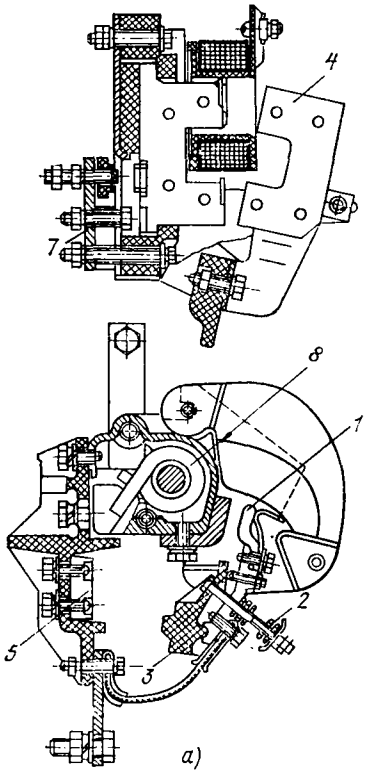
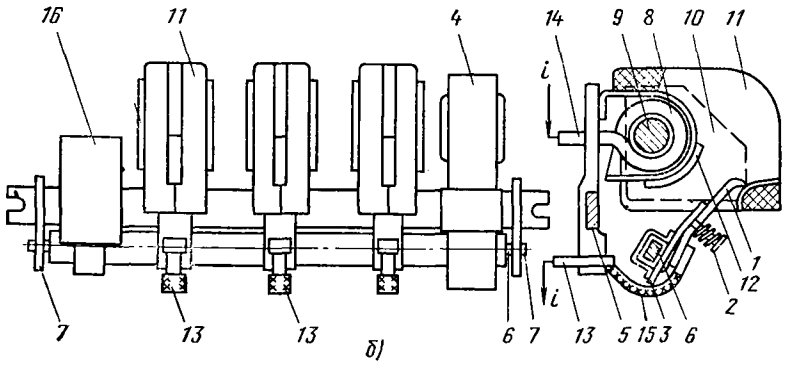


Рис. 8.4. Контактор серии КТ-6000:
а — магнитная система; *б* — контактная система



рое гашение дуги при отсутствии гибких связей. Отсутствие гибкой связи облегчает работу электромагнита и уменьшает габариты аппарата. В качестве материала главных контактов применяется металлокерамика, а для вспомогательных — серебро или биметалл. Основой биметаллического контакта является медь, покрытая тонкой пластиной из серебра.

В контакторах переменного тока наряду с магнитным гашением дуги широко применяются дугогасительные решетки (см. § 4.11), особенно при облегченных режимах работы.

б) **Электромагнит.** Для привода контактов контактора переменного тока широкое распространение получили электромагниты с Ш- и П-образными магнитопроводами. Магнитопровод электромагнита состоит из двух сердечников, один из которых неподвижен, другой (якорь) связан через рычаги с контактной системой. Для амортизации удара якоря о неподвижный сердечник последний крепится к основанию с помощью пружины. Это улучшает условия работы и контактной системы, поскольку при включении не возникает вибрация основания контактора.

С целью устранения вибрации якоря во включенном положении на полюсах магнитной системы устанавливаются короткозамкнутые витки. Как указывалось в § 5.6, коротроткозамкнутые витки наиболее эффективны при малом рабочем зазоре. Поэтому для плотного прилегания полюсов их поверхность должна шлифоваться.

Из-за изменения индуктивности катушки ток при притянутом якоре значительно меньше, чем при отпущенном (§ 5.3). В среднем можно считать, что пусковой ток электромагнита равен десятикратному току притянутого состояния. Для больших контакторов это значение может достигать 15-кратного. В связи с большим пусковым током недопустима подача напряжения на катушку, если якорь по каким-либо причинам удерживается в отпущенном положении. Катушки электромагнитов большинства контакторов допускают до 600 включений в час при ПВ = 40 %.

В особо тяжелых условиях работают электромагниты пятиполюсных контакторов. Для обеспечения нормальной работы пяти контактных пар необходима форсировка электромагнита.

Электромагниты контакторов переменного тока могут также питаться от сети постоянного тока. Такие электро-

магниты имеют специальную катушку с форсировочным резистором (см. рис. 5.23), который шунтирован размыкающим вспомогательным контактом контактора или контактами другого аппарата. Параметры катушек и форсировочных резисторов приводятся в справочных материалах.

При уменьшении зазора тяговая характеристика электромагнита переменного тока поднимается менее круто, чем в электромагните постоянного тока (§ 5.6), и благодаря этому ближе подходит к противодействующей. В результате напряжение отпускания близко к напряжению срабатывания. Относительно высокий коэффициент возврата (0,6—0,7) позволяет использовать контакторы переменного тока для защиты электродвигателей от снижения сетевого напряжения. При понижении напряжения сети до $(0{,}6 \div 0{,}7)U_{ном}$ происходит отпадание якоря и отключение двигателя.

Электромагниты контакторов обеспечивают надежную работу в диапазоне колебания питающего напряжения 85—110 % $U_{ном}$. Поскольку катушка контактора питается через замыкающий вспомогательный контакт, то включение контактора не происходит автоматически после восстановления напряжения до номинального значения (см. рис. 8.11). Как указывалось в § 5.7, срабатывание и отпускание электромагнита переменного тока происходят значительно быстрее, чем электромагнита постоянного тока. Собственное время срабатывания контакторов составляет 0,03—0,05, а время отпускания 0,02 с.

в) **Контакторы серии МК**. Контакторы серии МК [9.5] могут работать в цепях постоянного тока напряжением до 440 В и в цепях переменного тока напряжением до 660 В, частотой 50, 60 Гц при токах до 160 А. Электромагнитный привод контактора выполняется только на постоянном токе с напряжением 24—220 В. Общий вид контактора дан на рис 8.5. Все детали монтируются на стальной скобе *1*. Якорь электромагнита *2* притягивается к двум полюсам П-образного магнитопровода электромагнита *3* и через изоляционные колодки *4*, *5* действует на системы главных *6* и вспомогательных контактов *7*. Система главных контактов показана на рис. 8.6. Все детали крепятся к изоляционной плите *1*. Якорь электромагнита воздействует на шток привода контактов *2*, на котором установлен подвижный мостиковый контакт *4*. Неподвижный контакт *3* укреплен на скобе *5*. Нажатие контактов создается пружиной *6*. Воз-

врат подвижного контакта в начальное положение производится возвратной пружиной 7. За счет мостикового контакта каждый полюс главной цепи имеет два разрыва, что способствует гашению дуги переменного тока. Для гашения дуги постоянного тока имеются две системы магнитного гашения с катушкой тока 8. Контакторы в зависимости от модификации могут иметь от одной до трех систем главных контактов. Таким образом, контактор может работать

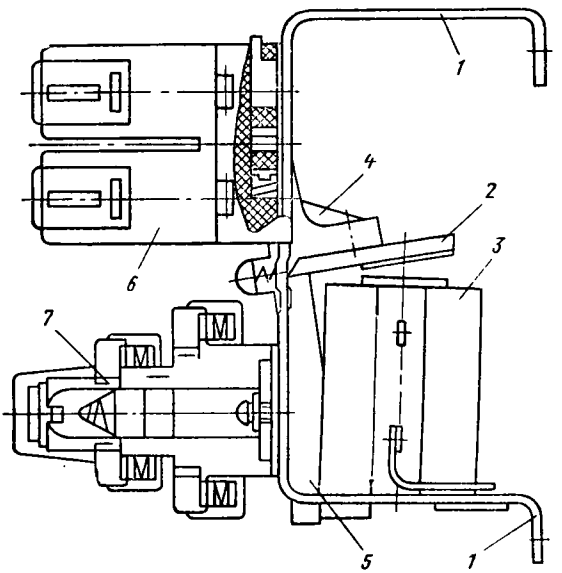


Рис. 8.5. Контактор серии МК

в трехфазных цепях и при этом использоваться для пуска трехфазных асинхронных двигателей. Контактор имеет также четыре цепи вспомогательных замыкающих или размыкающих контактов. Механическая износостойкость контакторов с номинальным током до 63 А составляет $16 \cdot 10^6$, с током 100 и 160 А — $10 \cdot 10^6$ циклов. Допустимая частота срабатываний составляет 1200 в час при ПВ = 40 %. При номинальном токе 40 А и категории применения АС-4 износостойкость не менее 10^6, при номинальном токе 160 А — $0{,}2 \cdot 10^6$ циклов. Контакторы обеспечивают 50 отключений удвоенного номинального тока при напряжении 110 % $U_{ном}$ с интервалами между включениями не менее 10 с. Собст-

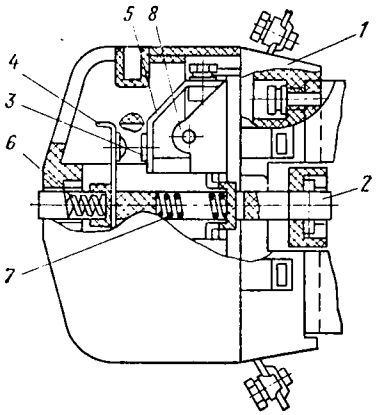
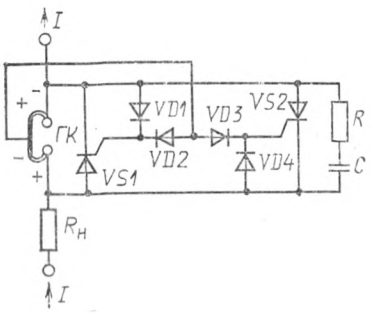


Рис. 8.6. Система главных контактов контактора МК

венное время включения 0,08 и отключения 0,06 с. Более подробные данные приведены в [9.5].

Для увеличения износостойкости и надежности контакторов серии МК используется полупроводниковая приставка [8.2], схема которой приведена на рис. 8.7. Главные контакты *ГК* шунтированы тиристорами *VS1* и *VS2*, управление которыми осуществляется через разделительные диоды *VD2* и *VD3*. Если в данный полупериод направление тока соответствует показанному на рис. 8.7, то напряжение, приложенное между мостиком главного контакта и верхним неподвижным главным контактом, через диод *VD2* открывает тиристор *VS1*, по которому начинает проходить ток цепи. После прохождения тока через нуль тиристор закрывается и процесс отключения заканчивается. Если ток имеет обратную полярность, то работают диод *VD3* и тиристор *VS2*. Для защиты управляющих переходов тиристоров от превышений напряжения служат диоды *VD1* и *VD4*. Цепочка *RC* облегчает условия восстановления напряжения и снижает перенапряжения на тиристорах. Общий вид контактора серии МК с приставкой дан на рис. 8.8. Полупроводниковая приставка расположена в корпусе *4*. Контакторы МК с приставкой предназначены для тяжелого режима работы АС-4 с частотой коммутации 1200 в час и более. Их коммутационная износостойкость составляет $5 \cdot 10^6$ циклов при токе $I_{ном}=63$ А и $3 \cdot 10^6$ циклов при токе $I_{ном}=100$ А. Номинальный рабочий ток $I_{р,ном}$ при этом берется равным $0{,}6\ I_{ном}$.

г) **Вакуумные контакторы.** Вакуумные контакторы (рис. 8.9, *а*) имеют герметичное ДУ, с помощью которого отключение коммутируемой цепи происходит в вакуумной среде за один-два полупериода (§ 4.1). На такой основе созданы трехфазные вакуумные контакторы типов КТ12Р33 и КТ12Р37 с номинальными токами 160 А и 400 А и номинальными напряжениями 660 и 1140 В. Контакторы предна-



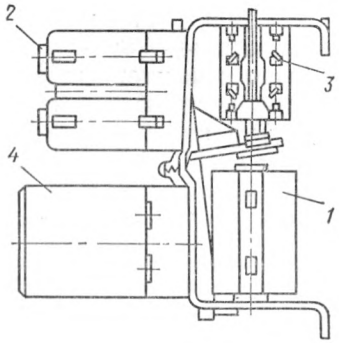


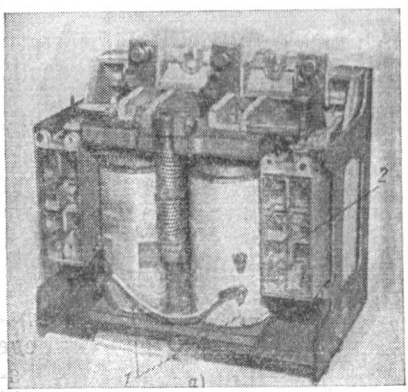
Рис. 8.7. Схема полупроводниковой приставки к контактору МК

Рис. 8.8. Контактор типа МК на номинальный ток 63 А с полупроводниковой приставкой:

1 — электромагнит; *2* — дугогасительное устройство; *3* — вспомогательные контакты; *4* — полупроводниковая приставка

значены для работы в режимах АС-3 и АС-4 при числе циклов 600 и 1200 в час с высокой износостойкостью [8.3].

Общий вид трехфазного вакуумного контактора показан на рис. 8.9, *а*. Якорь и две катушки *1* электромагнита постоянного тока видны на рисунке. Вспомогательные контакты *2* размещены слева и справа от электромагнита и за-



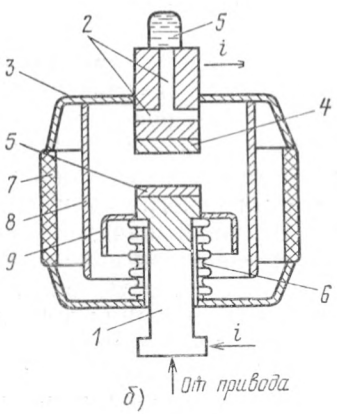


Рис. 8.9. Вакуумный контактор:

а — общий вид; *б* — дугогасительное устройство

щищены прозрачными пыленепроницаемыми крышками, что позволяет производить осмотр контактов без их разборки. В более совершенных конструкциях вспомогательные контакты выполняются на герконах (см. гл. 11). Зазор между главными контактами 1,2 мм и увеличивается в процессе работы до 2 мм. Возможна однократная регулировка зазора. Малый ход контактов обеспечивает малую вибрацию и износостойкость до $2 \cdot 10^6$ циклов при ПВ=40 %, частоте включений 600 в час, режиме АС-3 и напряжении 1140 В. Ток среза контакторов не превышает 1,5 А, что обеспечивает их работу без перенапряжений в цепях с током 160—400 А. Дугогасительное устройство приведено на рис. 8.9, *б*. Подвижный контакт *1* связан с якорем электромагнита и отключающей пружиной. Неподвижный контакт *2* закреплен в корпусе *3*. Поверхности контактирования облицованы металлокерамическими пластинами *4* и *5*. Подвижный контакт *1* соединен с нижней частью ДУ с помощью сильфона *6*, представляющего собой металлическую гармошку, выполненную из нержавеющей стали. Сильфон дает возможность перемещения подвижному контакту. Подвижный и неподвижный контакты изолируются друг от друга стеклянным или керамическим цилиндром *7*. Экраны *8* и *9* выравнивают электрическое поле между контактами и защищают цилиндр и сильфон от паров металлов, появляющихся при гашении.

8.4. МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

а) **Основные требования и условия работы.** Магнитным пускателем называется электрический аппарат, предназначенный для пуска и отключения короткозамкнутых асинхронных двигателей. Как правило, в пускатель помимо контактора встроены тепловые реле для защиты двигателя от токовых перегрузок и «потери фазы». Работа асинхронных двигателей в значительной степени зависит от таких свойств пускателей, как износостойкость, коммутационная способность, надежность защиты двигателя от перегрузок. В процессе эксплуатации довольно часто обрывается одна из фаз трехфазного питающего напряжения, например из-за перегорания предохранителя. К двигателю при этом подводятся только две фазы и ток в статоре резко возрастает, что приводит к выходу его из строя из-за нагрева обмотки до высокой температуры. Тепловые реле пускателя от этих токов должны срабатывать и отключать двигатель.

При включении асинхронного двигателя пусковой ток в 6 раз превышает номинальный. При таком токе даже незначительная вибрация контактов быстро выводит их из строя. Это накладывает высокие требования в отношении вибрации и износа контактов. С целью уменьшения времени вибрации контакты и подвижные части контакторов магнитного пускателя делаются возможно легче, уменьшается их скорость, увеличивается контактное нажатие.

При номинальных токах до 100 А целесообразны серебряные накладки на медных контактах. При токе выше 100 А эффективна композиция серебра и оксида кадмия.

После разгона двигателя ток падает до номинального значения. Поэтому отключение работающего двигателя происходит при меньшей токовой нагрузке контактов.

При отключении двигателя восстанавливающееся напряжение на контактах равно разности напряжения сети и ЭДС двигателя. В результате на контактах контактора появляется напряжение, составляющее 15—20 % $U_{ном}$, т. е. отключение происходит в облегченных условиях.

Нередки случаи, когда двигатель необходимо отключить от сети сразу после пуска. В этих случаях контактор пускателя отключает ток, равный шестикратному номинальному при низком коэффициенте мощности ($\cos\varphi \leqslant 0{,}3$) и восстанавливающемся напряжении, равном номинальному напряжению сети. По действующим нормам после 50-кратного включения и отключения заторможенного двигателя пускатель должен быть пригоден для дальнейшей работы. В технических данных магнитных пускателей указываются их номинальный ток и номинальная мощность двигателя при различных напряжениях. Поскольку ток, отключаемый пускателем, относительно мало падает с ростом напряжения, мощность двигателя, с которым может работать данный пускатель, возрастает с увеличением номинального напряжения. Наибольшее рабочее напряжение пускателей равно 660 В.

Электрическая износостойкость контакторов пускателя обратно пропорциональна мощности управляемого электродвигателя в степени 1,5—2. Для повышения срока службы пускателя его необходимо выбирать на ток, превышающий номинальный ток двигателя.

Двигатели меньшей мощности быстрее достигают номинальной частоты вращения. Поэтому при их отключении разрывается установившийся номинальный ток, что облег-

чает работу пускателя и повышает допустимое число включений в час.

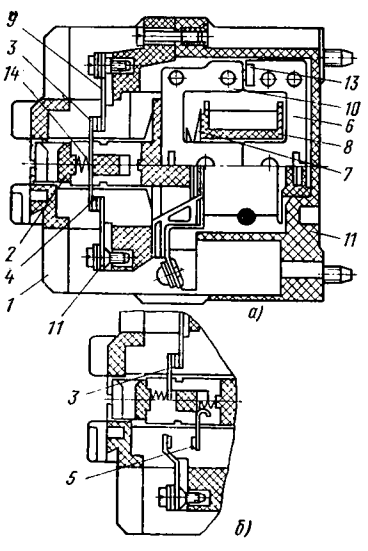
С учетом широкого распространения магнитных пускателей большое значение приобретает снижение потребляемой ими мощности, которая расходуется в электромагните контактора и других элементах схемы (тепловых реле и т. д.). Потери мощности в электромагните составляют примерно 60, в тепловых реле 40 % общих потерь пускателя.

б) **Конструкция и схема включения.** Магнитные пускатели серии ПМЛ работают в сети переменного тока напряжением 660 В при номинальном токе от 10 до 200 А. Коммутационная износостойкость пускателя на 200 А составляет $2 \cdot 10^6$ при 600 включениях в час и напряжении 380 В для категории применения АС-3 и $320 \cdot 10^3$ при 600 включениях в час и том же напряжении для категории применения АС-4. При напряжении 660 В износостойкость та же при 300 включениях в час. При $I_{ном} < 10$ А износостойкость при $I_р < I_{ном}$ $N_р = N_{ном} I_{ном}/I_р$. При $I_{ном} > 10$ А

$$N_р = N_{ном} (I_{ном}/I_р)^2,$$

где $N_{ном}$ — износостойкость при номинальном токе $I_{ном}$.

Магнитный пускатель на номинальный ток 10 А (рис. 8.10, *а*) имеет мостиковую контактную систему (позиции *3*, *9*, *11*) с металлокерамическими контактами *4*, расположенными в ДУ *1*. Контактное нажатие создается пружиной *14*, упирающейся в траверсу *2*. На контакты воздействует электромагнит *10* с Ш-образным магнитопроводом и короткозамкнутым витком *13*, расположенным на неподвижной части магнитопровода *6*.



Возвратная пружина *7* расположена внутри электромагнита. На его среднем стержне размещена катушка *8*. При $I_{ном} > 10$ А ДУ выполняется в виде дугогасительной решетки на каждом разрыве. В системе вспомогательных контактов можно установить до четырех дополнительных контактов *5* (рис. 8.10, *б*). Детали пускателя прикреплены на ос-

Рис. 8.10. Магнитный пускатель серии ПМЛ

новании *11*. В корпусе пускателя устанавливается тепловое трехфазное реле типа РТЛ, позволяющее регулировать ток срабатывания.

В пускателях серии ПМА на токи от 40 до 160 А и напряжение 380—660 В электромагнит может быть как переменного, так и постоянного тока. Частота включений достигает 1200 в час. Коммутационная износостойкость составляет от 0,5 до $2{,}5 \cdot 10^6$ циклов в зависимости от условий работы.

В схеме пускателя, приведенной на рис. 8.11, в двух фазах двигателя *М* включены нагревательные элементы тепловых реле *КК1*, *КК2*. Тепловые реле защищают двигатель от перегрузки, а предохранители *FU1—FU3* защищают питающую сеть от КЗ в двигателе.

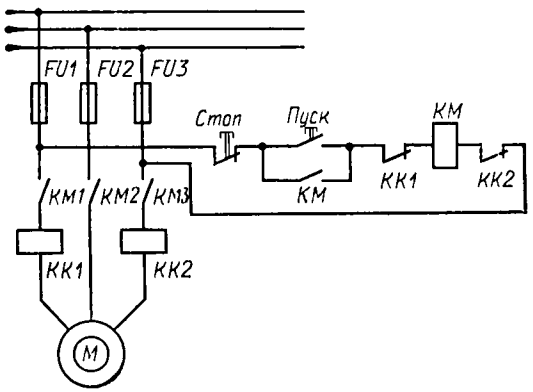


Рис. 8.11. Схема включения нереверсивного пускателя

Главные контакты *КМ1—КМ3* пускателя включены последовательно с предохранителями *FU1—FU3*. Катушка *КМ* контактора подключается к сети через контакты тепловых реле и кнопок управления «Пуск» и «Стоп». При нажатии кнопки «Пуск» напряжение на катушку *КМ* подается через замкнутые контакты кнопки «Стоп» и замкнутые контакты тепловых реле. При срабатывании контактора замыкаются вспомогательные контакты *КМ*, шунтирующие замыкающие контакты кнопки «Пуск», которую после этого можно отпустить. Для отключения двигателя нажимается кнопка «Стоп», после чего контакты *КМ1—КМ3* размыкаются. При токовой перегрузке двигателя срабатывают *КК1*, *КК2*, контакты которых разрывают цепь катушки *КМ*. При этом контакты *КМ1—КМ3* размыкаются и двигатель отключается.

Высокий коэффициент возврата электромагнитов контакторов переменного тока позволяет защищать двигатель от понижения напря-

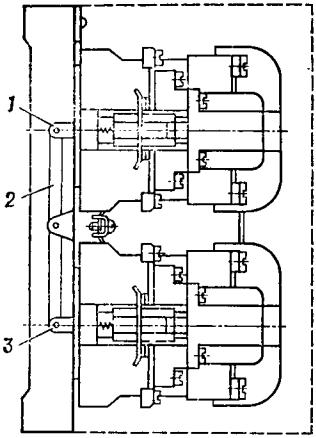


Рис. 8.12. Реверсивный пускатель

жения сети [электромагнит отпускает при $U=(0{,}6\div0{,}7)\ U_{ном}$]. При восстановлении напряжения сети до номинального значения самопроизвольное включение пускателя не происходит, так как после размыкания контакта *КМ* цепь катушки *КМ* не замкнута.

На рис. 8.12 показан реверсивный магнитный пускатель. Такой пускатель помимо пуска и защиты двигателя обеспечивает его реверс с помощью изменения последовательности фаз. Пускатель содержит два контактора *1* и *3*, якоря которых соединены между собой рычагом *2* механической блокировки.

При наличии напряжения на катушке контактора *1* его якорь притягивается и с помощью рычага *2* удерживает якорь контактора *3* в крайнем положении. Благодаря этому появление напряжения на катушке контактора *3* не приводит к его срабатыванию. При этом зазор в электромагните контактора *3* остается максимальным, что приводит к большому току в его катушке. Для того чтобы катушка не вышла из строя, механическая блокировка дополняется электрической.

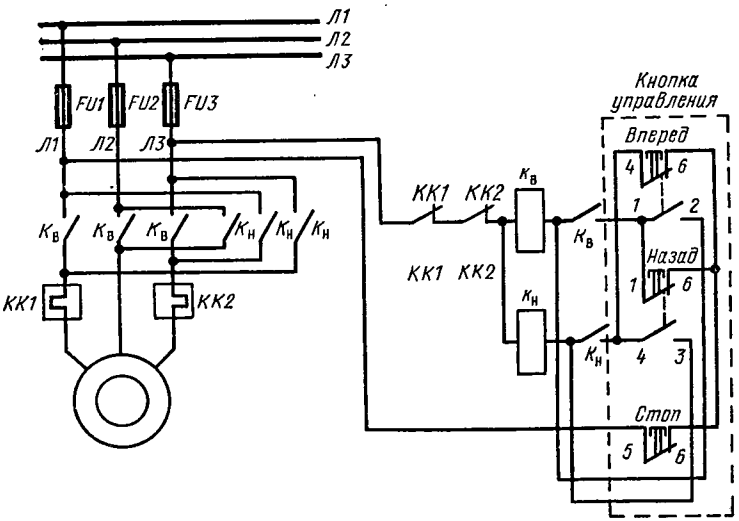


Рис. 8.13. Схема включения реверсивного пускателя

Схема включения реверсивного пускателя приведена на рис. 8.13. Кнопка управления «Вперед» имеет замыкающие контакты *1—2* и размыкающие контакты *4—6*. Аналогичные контакты имеет кнопка «Назад» для пуска двигателя в обратном направлении. При пуске «Вперед» замыкаются контакты *1—2* соответствующей кнопки и процесс протекает так же, как и у нереверсивного пускателя на рис. 8.11. При этом цепь катушки контактора $K_в$ замыкается через размыкающие контакты *1—6* кнопки «Назад». Одновременно размыкаются размыкающие контакты *4—6* кнопки «Вперед», разрывается цепь катушки контактора $K_п$. При нажатии кнопки «Назад» вначале размыкаются контакты *1—6*, обесточивается катушка контактора $K_в$ и отключаются его контакты $K_в$. Затем контактами *4—3* включается контактор $K_н$ после чего замыкаются его контакты. При этом очередность фаз питания двигателя становится обратной. При одновременном нажатии кнопок «Вперед» и «Назад» оба контактора не включаются.

8.5. ТИРИСТОРНЫЙ ПУСКАТЕЛЬ

На рис. 8.14 показан один из вариантов схемы бесконтактного — тиристорного пускателя. Силовой блок *Б1* содержит силовые тиристоры *VS1—VS3* и диоды *VD1—VD3*, рассчитанные на номинальный и пусковой токи двигателя *М*. При подаче сигнала управления на электроды *1—2*, *3—4*, *5—6* тиристоры открываются и двигатель подключается к сети. В отрицательный полупериод, когда тиристоры закрываются отрицательным анодным напряжением, ток двигателя проходит по диодам *VD1—VD3*. Диоды могут быть заменены тиристорами.

При снятии сигнала управления (при перегрузке, потере фазы, нажатии кнопки «Стоп») тиристоры закрываются. Следующий полупериод тока пропускается диодами. После этого диоды *VD1*, *VD2*, *VD3* закрываются и двигатель отключается от сети. По тиристорам и диодам протекает лишь небольшой ток утечки.

Сигналы управления тиристорами формируются в блокинг-генераторе *Б2*, который получает напряжение от блока питания *Б3*. При нажатии кнопки «Пуск» включается тиристор *VS5* и все напряжение прикладывается к резистору *R3*. При этом транзистор *VT3* закрыт, так как напряжение на резисторе *R3* больше, чем на резисторе *R4*. По мере заряда конденсатора *C2* наступают условия для открытия транзистора *VT3* и конденсатор *C2* начинает разряжаться на обмотку w_1 трансформатора *Т2*. Электродвижущая сила, наводящаяся при этом на обмотке, $w_{о.с}$ способствует быстрому и полному открытию транзистора *VT3*. При разряде конденсатора напряжение на резисторе *R3* возрастает, транзистор *VT3* закрывается и снова начинается заряд конденсатора *C2*. Таким образом, генерируются импульсы тока в обмотке w_1 и в трех выходных обмотках w_2 появляются управляющие импульсы. Диоды *VD5—VD7* пропускают импульсы только положительной полярности.

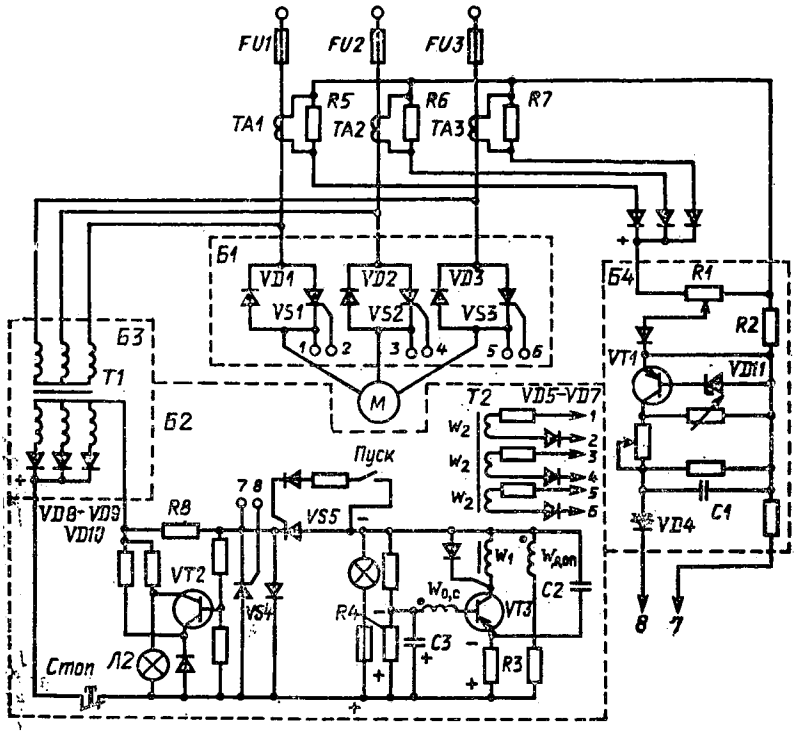


Рис. 8.14. Тиристорный пускатель

Длительность импульса 30 мкс при паузе между импульсами 300 мкс (частота около 3 кГц).

Аналогичные схемы могут управляться сигналами постоянного тока или переменным током низкой частоты. Использование блокинг-генератора дает возможность быстро включать тиристор и уменьшить нагрузку по его управляющему электроду.

При нормальном режиме транзистор *VT2* блока *Б2* насыщен и лампа *Л2* не горит. Если на контакты *7*, *8* блока *Б2* подано напряжение с одноименных контактов блока защиты *Б4*, тиристор *VS4* открывается и блокинг-генератор лишается питания. Блок питания *Б3* включается только на резистор *R8*. При потере питания генерация в блоке *Б2* прекращается и тиристор *VS5* отключается. Одновременно транзистор *VT2* закрывается и загорается лампа *Л2*, сигнализируя об отключении пускателя от защиты. В случае потери фазы в выходном напряжении (после диодов *VD8—VD10*) появляется пауза. В эту паузу блок *Б2* оста-

навливается и тиристор *VS5* отключается, что ведет к закрытию силовых тиристоров.

Блок *Б4* защиты двигателя и силовых тиристоров от перегрузки питается от трансформаторов тока *ТА1—ТА3*. Напряжение с нагрузочных резисторов выпрямляется и подается на потенциометр *R1*. Параметры трансформаторов *ТА1—ТА3* и резисторов *R1*, *R5—R7* выбираются так, что при номинальном токе во всех трех фазах напряжение, снимаемое с потенциометра *R1*, меньше напряжения пробоя стабилитрона *VD11*. До тех пор пока напряжение на стабилитроне меньше напряжения пробоя ($U<U_{проб}$), сопротивление стабилитрона очень высоко. При этом ток базы транзистора *VT1* недостаточен для его открытия. Если ток хотя бы в одной фазе превысит номинальное значение, то возникает неравенство $U>U_{проб}$, сопротивление стабилитрона резко падает, ток в базе *VT1* возрастает и он насыщается. Ток в стабилитроне ограничивается резистором *R2* до допустимого значения. Если восстановится неравенство $U<U_{проб}$, то сопротивление стабилитрона снова возрастет, транзистор *VT1* закроется. После открытия транзистора *VT1* начинается заряд конденсатора *С1*. Напряжение с конденсатора *С1* на выход *7*, *8* не подается до тех пор, пока не превысит напряжение переключения динистора *VD4*. Динистор имеет такую же вольт-амперную характеристику, как и тиристор при $I_у=0$. Если перегрузка была настолько кратковременной, что конденсатор *С2* не успел зарядиться, то напряжение на выходе *7*, *8* не появится и пускатель останется в работе. Если $U_{С1}$ станет больше напряжения переключения динистора *VD4*, произойдет разряд конденсатора *С1* на цепь управления тиристора *VS4* блока *Б2* и последний откроется. При этом прекратится генерация импульсов, открывающих *VS1—VS3*, и двигатель остановится. Параметр срабатывания блока защиты регулируется потенциометром *R1*. За счет усложнения блока защиты можно создать выдержку времени в зависимости от условия перегрузки. Защита двигателя и силовых тиристоров от токов КЗ в данном пускателе осуществляется быстродействующими предохранителями *FU1—FU3* типа ПНБ-5 (§ 16.4).

По сравнению с контактными тиристорный пускатель обладает следующими преимуществами:

1. Отсутствие электрической дуги при коммутациях делает аппарат незаменимым при работе во взрывоопасных и пожароопасных средах.
2. Высокая электрическая износостойкость ($15\cdot10^6$ циклов).
3. Совершенная защита от токов перегрузки и КЗ, а также при потере фазы, что обеспечивает увеличение срока службы двигателей.
4. Допустимое число включений достигает 2000 в час.
5. Длительность отключения не превышает 0,02 с.
6. Высокая надежность и долговечность, а также отсутствие необходимости в уходе при эксплуатации.

Недостатками тиристорного пускателя являются сложность схемы,

большие габариты и высокая стоимость. Несмотря на эти недостатки бесконтактные пускатели находят широкое применение во взрыво- и пожароопасных производствах и других областях техники, требующих высокой надежности.

8.6. ВЫБОР КОНТАКТОРОВ И ПУСКАТЕЛЕЙ

Важнейшей характеристикой контакторов и пускателей являются режимы коммутации нагрузки. В табл. 8.1 даны характеристики режимов коммутации контакторов, которые следует использовать при их выборе. Для контакторов серии КПВ допустимый ток повторно-кратковременного режима с учетом нагрева контактов дугой можно определить по формуле

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{ном}}}{\sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\%}}{100} - \frac{n}{600}}\sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\%}}{100}}},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток контактора для длительного режима работы; $I_{\text{доп}}$ — допустимый ток повторно-кратковременного режима; ПВ — продолжительность включения, %; n — число включений в час.

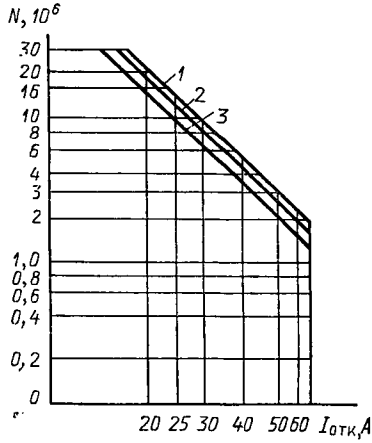
В ряде случаев заводом-изготовителем указываются допустимые коммутируемые токи контактора при различных режимах работы и различном напряжении коммутируемой цепи. В табл. 8.4 приведены токи, коммутируемые контактором серии МК в различных режимах. Коммутационная износостойкость этих контакторов при переменном токе показана кривыми на рис. 8.15. Износостойкость контакторов МК1 на постоянном токе представлена на рис. 8.16. Износостойкость вспомогательных контактов составляет $1{,}6 \cdot 10^6$ при индуктивной нагрузке ($T \leqslant 50$ мс; $\cos\varphi \geqslant 0{,}4$) и коммутации токов, указанных в табл. 8.5. В режиме редких коммутаций коммутационная способность вспомогательных контактов значительно выше указанной в табл. 8.5. Так, при постоянном токе и напряжении 110 В ток при включении составляет 25, а при отключении 2,5 А. Колебания напряжения на катушке контактора в эксплуатации должны находиться в пределах, гарантируемых заводом-изготовителем (обычно +10 и —15 % номинального значения).

При заказе контактора необходимо указывать его тип, напряжение и ток цепи главных контактов (частоту, если ток переменный), число и исполнение вспомогательных кон-

Таблица 8.4. **Коммутационная способность контакторов МК**

Род тока	Категория применения	Тип контактора	Режим нормальной коммутации				Режим редких коммутаций			
			Включение		Отключение		Включение		Отключение	
			Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение
Постоянный	ДС-3	МК1	40	220	40	220	400	242	400	242
		МК2	63	220	63	220	630	242	630	242
		МК3	100	220	100	220	1000	242	1000	242
		МК4	120	220	120	220	1600	242	1600	242
Переменный	АС-4	МК1	96	380	96	380	400	418	320	418
		МК1	60	500	60	500	250	550	200	550
		МК2	151,2	380	151,2	380	630	418	504	418
		МК2	96	500	96	500	400	550	320	550
		МК2	96	660	96	660	400	726	320	726

Рис. 8.15. Зависимость коммутационной износостойкости контакторов МК1 от значения отключаемого переменного тока при работе в режиме АС-3 (ВО — цикл включения-отключения; частота 1200 ВО/ч при ПВ=40 %) при I=40 А; кривые *1* и *2* для трехполюсного контактора при напряжениях 300 и 500 В. Кривая *3* — для двухполюсного при напряжении 380 В



тактов (замыкающих и размыкающих), напряжение катушки, климатическое исполнение и категорию размещения. Так, например, для контактора серии МК для тока 40 А частотой 50 Гц и напряжением 380 В, предназначенного для работы в зоне умеренного климата в закрытом помещении, следует написать: контактор МК1, 380 В, 50 Гц, 40 А (главные контакты), один замыкающий контакт; вспомогательные контакты: два замыкающих и два размыкающих; катушка 24 В. Исполнение У3.

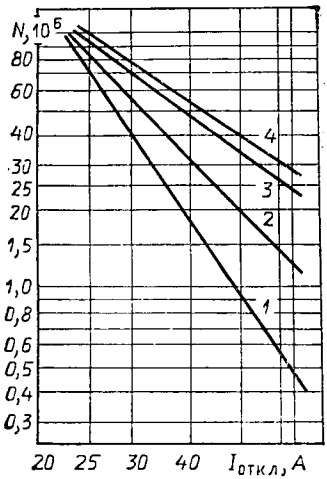


Рис. 8.16. Зависимость коммутационной износостойкости контакторов МК1 от значения отключаемого постоянного тока $U_{ном,р}$=220 В, частота включений 1200 в час, ПВ=40 % при I=40 А; кривые *1* и *3* для контакторов с одним разрывом соответственно в режимах ДС-3 и ДС-2. Кривые *2* и *4* для контактора с двумя разрывами в режимах ДС-3 и ДС-2.

Таблица 8.5. **Коммутационная способность вспомогательных контактов контакторов МК**

Род тока	Напряжение, В	Ток, А	
		включаемый	отключаемый
Постоянный	110	1,25	1,25
	220	0,5	0,5
Переменный	110 (127)	60	6
	220	35	3,5
	660	10	1,5

Глава девятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

а) **Классификация.** Под реле понимают такой электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра. Хотя бы один из этих параметров должен быть электрическим.

По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода и защиты энергосистем. По принципу действия реле делятся на электромагнитные, поляризованные, тепловые, индукционные, магнитоэлектрические, полупроводниковые и др.

В зависимости от входного параметра реле можно разделить на реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин. Отметим, что реле может реагировать не только на входной параметр, но и на разность значений (дифференциальное реле), изменение знака или скорости изменения входного параметра. Иногда реле, имеющее только один входной параметр, должно воздействовать на несколько независимых цепей. В этом случае реле воздействует на другое, так называемое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется и тогда, когда мощность основного реле недостаточна для воздействия на управляемые цепи.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на контактные и бесконтактные. Выходным пара-

метром бесконтактных реле является резкое изменение сопротивления, включенного в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует большое сопротивление управляемой цепи бесконтактного реле. Это состояние бесконтактного реле называется закрытым. Замкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует малое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле. Такое состояние бесконтактного реле называется открытым.

По способу включения реле различаются на первичные и вторичные.

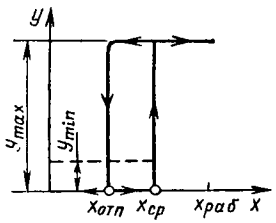


Рис. 9.1. Характеристика управления реле

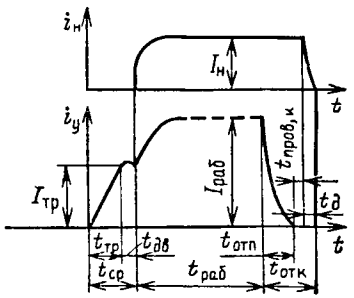


Рис. 9.2. Выходной и входной параметры электромагнитного реле

Первичные реле включаются в управляемую цепь непосредственно, вторичные — через измерительные трансформаторы.

б) **Основные характеристики реле.** Рассмотрим характеристику управления реле, представляющую собой зависимость выходного параметра от входного для реле с замыкающим контактом. У этих реле при отсутствии входного сигнала контакты разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление, введенное в управляемую цепь, достаточно велико и ток имеет минимальное значение. На рис. 9.1 по оси абсцисс отложено значение входного параметра x, а по оси ординат — выходного параметра y. Значение входного параметра x (напряжения, тока и т. д.), при котором происходит срабатывание реле, называется параметром (напряжением, током и т. д.) срабатывания. До тех пор, пока $x<x_{ср}$, выходной параметр y равен нулю либо своему минимальному значению y_{min} (для бесконтактных аппара-

тов). При $x=x_{ср}$ выходной параметр скачком меняется от y_{min} до y_{max}. Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение входного параметра, то при $x \leqslant x_{отп}$ происходит скачкообразное возвращение выходного параметра от значения y_{max} до 0 или y_{min} — отпускание реле.

Значение входного параметра, при котором происходит скачкообразное отпускание реле, называется параметром отпускания. Значения параметров срабатывания или отпускания, на которые отрегулировано реле, называются уставкой по входному параметру.

Время с момента подачи команды на срабатывание до момента начала возрастания выходного параметра называется временем срабатывания. Это время зависит от конструкции реле, схемы его включения и входного параметра. Чем больше значение входного параметра $x_{раб}$ по сравнению с $x_{ср}$, тем быстрее срабатывание реле. Отношение $x_{раб}/x_{ср}$ называется коэффициентом запаса. Следует отметить, что с ростом коэффициента запаса возрастает вибрация контактов электромагнитного реле.

Для ряда реле очень важно отношение $x_{отп}/x_{ср}$, называемое коэффициентом возврата.

Время с момента подачи команды на отключение до достижения минимального значения выходного параметра называется временем отключения. Для контактных реле это время состоит из двух интервалов — времени отпускания и времени горения дуги. На рис. 9.2 даны зависимости входного $i_у$ и выходного $i_н$ параметров электромагнитного реле от времени. Входным параметром в данном случае является ток в обмотке реле, выходным — ток в управляемой цепи (цепи нагрузки).

Для рис. 9.2 принято, что включение обмотки реле происходит при $t=0$. При $t=t_{тр}$ якорь электромагнита реле трогается и начинает движение. В течение времени $t_{дв}$ якорь перемещается и в конце хода замыкается контакт в цепи нагрузки. Ток нагрузки $i_н$ возрастает от нуля до установившегося значения $I_н$. Время $t_{ср}=t_{тр}+t_{дв}$ называют временем срабатывания реле. После этого ток в обмотке реле продолжает расти до установившегося значения $I_{раб}$. При отключении реле из рабочего состояния $t_{раб}$ цепь его обмотки разрывается и ток в ней спадает. В момент времени $t_{отп}$, когда усилие противодействующей пружины становится больше электромагнитного усилия, происходит отпускание якоря. Контакты реле разомкнутся после вы-

бора провала контактов через время $t_{пров,к}$ (см. § 3.4). После размыкания контактов загорается дуга, которая погаснет через время $t_д$ и ток в нагрузке $i_н=0$. Время $t_{отк}=t_{отп}+t_{пров,к}+t_д$ называется временем отключения.

Важным параметром, характеризующим усилительные свойства реле, является отношение максимальной мощности нагрузки в управляемой цепи $P_у$ к минимальной мощности входного сигнала $P_{ср}$, при котором происходит срабатывание реле.

Для контактных реле максимальная мощность $P_у$ определяется не длительным током, допустимым для данного контакта, а током нагрузки, который может быть многократно отключен.

в) **Требования, предъявляемые к реле.** Требования к реле в значительной мере определяются их назначением. К реле защиты энергосистем предъявляются требования селективности, быстродействия, чувствительности и надежности.

Под селективностью понимается способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы. Достаточно высокое быстродействие позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии. Минимальное значение входного параметра, при котором реле срабатывает, называется чувствительностью. Увеличение чувствительности позволяет улучшить качество электротехнических устройств. Так, например, повышение чувствительности релейной защиты позволяет сократить длину линии электропередачи, которая не может быть защищена от аварийных режимов.

Реле для защиты энергосистем должны иметь высокую надежность. В противном случае возможно развитие тяжелых аварий и недоотпуск большого количества электроэнергии.

Реле защиты энергосистемы эксплуатируются, как правило, в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, а также пыли и газов, вызывающих коррозию. Из-за того что аварийные режимы в системе редки, к этим реле не предъявляются высокие требования в части износостойкости.

К реле для схем автоматики, а также для управления и защиты электропривода предъявляются самые разнообразные специфические требования. Эти реле работают в тяжелых условиях эксплуатации: возможны удары, виб-

рация, воздух часто засорен пылью или агрессивными производственными примесями. Так как число включений в час в современных схемах электропривода достигает 1000—1200 и более, реле управления должны иметь механическую и электрическую износостойкость до $(1 \div 10) \cdot 10^6$ циклов. Надежность работы схем автоматики зависит от надежности работы отдельных элементов, в том числе и реле.

Из-за большого количества реле в современных схемах и большого количества выполняемых ими операций к ним предъявляются требования высокой надежности.

9.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) **Согласование тяговых и противодействующих характеристик.** Электромагнитные реле благодаря простоте конструкции и надежности широко распространены в схемах электропривода и в схемах защиты энергосистем. Электромагнитные реле приводятся в действие с помощью электромагнитов постоянного или переменного тока (см. гл. 5).

Рассмотрим работу максимального реле постоянного тока с простейшей магнитной системой клапанного типа (см. рис. 5.5).

На рис. 9.3 изображены тяговая и противодействующая характеристики реле. Противодействующие усилия создаются возвратной P_1 и контактными P_2 пружинами.

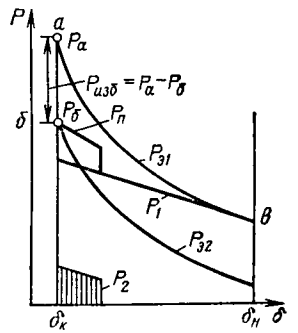


Рис. 9.3. Согласование характеристик электромагнитного реле

Усилие контактных пружин создает предварительное нажатие в момент соприкосновения контактов. В результате уменьшается вибрация контактов при срабатывании и обеспечивается необходимое контактное нажатие.

С учетом линейной зависимости силы пружины от ее деформации и относительно небольшого перемещения якоря противодействующее усилие пружин, приведенное к якорю, меняется линейно с изменением зазора. Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика $P_{э1}$ во всех точках хода якоря шла выше суммарной противодействующей характеристики $P_п = P_1 + P_2$. Для токового реле при данном начальном зазоре $\delta_н$ положение $P_{э1}$ зави-

сит от тока (см. § 5.6). При ненасыщенной магнитной системе тяговая сила пропорциональна квадрату тока.

Наименьшее значение тока, при котором кривая $P_{э1}$ начинает проходить выше зависимости $P_п$, определяет ток трогания $I_{тр}$ реле. Срабатывание реле определяется точкой *в* (зазор $\delta=\delta_н$), при которой $P_{э1}$ идет выше $P_п$. Для надежного включения в обмотку реле обычно подается ток $I_{раб}>I_{тр}$. Коэффициент запаса при этом $k_з=I_{раб}/I_{ср}$ и обычно составляет $k_з=1{,}4$.

С ростом $k_з$ тяговая характеристика поднимается, увеличивается тяговое электромагнитное усилие, действующее на якорь, увеличивается ускорение якоря, сокращается полное время включения. Однако при этом возрастают удары в механизме и вибрация контактов.

Для того чтобы устранить залипание якоря, в магнитной системе всегда создается конечный зазор $\delta_к$. При этом зазоре тяговое усилие значительно превышает противодействующее ($P_а—P_б=P_{изб}$).

Для отключения реле тяговая характеристика $P_{э2}$ во всех точках должна быть ниже характеристики $P_п$. При этом усилие, развиваемое противодействующими пружинами, больше электромагнитного усилия и якорь возвратится в начальное положение. Ток при таком положении характеристики называется током отпускания или током возврата.

При отпускании реле определяющей точкой является точка *б*, в которой характеристика $P_э$ идет ниже характеристики $P_п$.

Для реле защиты энергосистем и электропривода, контролирующих значение тока в узких пределах, коэффициент возврата $k_в=I_{отп}/I_{ср}$ должен быть возможно ближе к единице [9.1].

Допустим, требуется реле, которое срабатывает при токе 100 А и отпускает при токе 99 А, т. е. $k_в=0{,}99$. В электромагнитных реле такой $k_в$ получить трудно, и в этих случаях применяются электронные реле. Если реле применяется для защиты установки от чрезмерного понижения напряжения сети, то оно также должно иметь высокий $k_в$. Например, если установка должна отключаться от сети при напряжении, равном 70 % $U_{ном}$, то необходимо применить реле с $k_в=0{,}7$. Такой $k_в$ можно легко получить в электромагнитном реле переменного тока.

Рассмотренное реле срабатывает при любом направлении тока в обмотке. Такие реле называются нейтральными.

б) **Влияние различных факторов на коэффициент возврата.** Для конечного зазора $\delta = \delta_к$ (рис. 9.3)

$$P_а = \frac{1}{4} \frac{\mu_0 S}{\delta_к^2} w^2 I_{ср}^2 = k_1 I_{ср}^2,$$

где $P_а$ — электромагнитное усилие при $\delta = \delta_к$ и токе срабатывания $I_{ср}$; k_1 — конструктивный фактор, равный $\frac{1}{4} \frac{\mu_0 S}{\delta_к^2} w^2$; S — площадь зазора; w — число витков обмотки.

Для отпускания реле необходимо так уменьшить ток, чтобы развиваемое электромагнитное усилие стало равно

$$P_б = k_1 I_{отп}^2,$$

откуда можно получить

$$k_в = \frac{I_{отп}}{I_{ср}} = \sqrt{\frac{P_б}{P_а}}.$$

Из рис. 9.3

$$P_б = P_а - P_{изб}.$$

Тогда

$$k_в = \sqrt{\frac{P_а - P_{изб}}{P_а}} = \sqrt{1 - \frac{P_{изб}}{P_а}}. \qquad (9.1)$$

Поскольку всегда $P_{изб} > 0$, коэффициент возврата максимального реле $k_в < 1$. Для увеличения $k_в$ необходимо максимально сблизить тяговую и противодействующую характеристики с целью уменьшения $P_{изб}$. В реле, как правило, основное противодействующее усилие создается возвратной пружиной. Усилие контактной пружины невелико, и при рассмотрении коэффициента возврата им можно пренебречь.

Для получения высокого $k_в$ противодействующая характеристика должна быть такой же нелинейной, как и тяговая. Для максимального сближения тяговой и противодействующей характеристик последней можно придать нелинейный характер. Добиться этого удается ценой сложных конструктивных решений, снижающих надежность реле (противодействующее усилие создается несколькими пружинами). Такие решения применяются редко.

В простейшем случае и при одной пружине рекомендуется выбирать ее с наибольшей возможной жесткостью, чтобы противодействующая характеристика совпадала

с касательной, проведенной к тяговой характеристике при $\delta = \delta_н$. В этом случае значение $P_{изб}$ будет минимальным, а $k_в$ максимальным.

Если выбрать достаточно большое значение $\delta_к$ и малый рабочий ход якоря, равный $\delta_н - \delta_к$, то характеристика противодействующей пружины достаточно близко подойдет к тяговой и коэффициент возврата может быть получен примерно 0,7—0,8 (рис. 9.4).

Большими возможностями согласования характеристик обладает электромагнитная система с поворотным движением якоря (рис. 9.5). Якорь *3* Г-образной формы выполнен из тонкой электротехнической стали. При малом рабочем зазоре он насыщается, благодаря чему значение $P_{изб}$ уменьшается и $k_в$ возрастает.

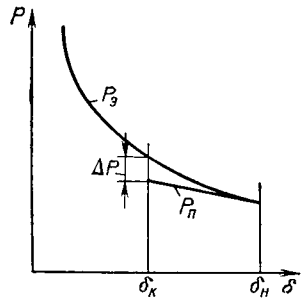


Рис. 9.4. Условия получения высокого коэффициента возврата

Изменяя форму якоря и полюсов, можно получить практически любую тяговую характеристику.

Помимо указанных факторов на коэффициент возврата реле оказывают влияние трение перемещающихся деталей электромагнита и гистерезис материала магнитопровода. Трение является дополнительным усилием сопротивления и вызывает увеличение тока трогания. Трение препятствует и отпусканию. Усилие возвратной пружины уменьшается, что вызывает уменьшение тока отпускания. В результате коэффициент возврата уменьшается. Для того чтобы трение меньше сказывалось на коэффициенте возврата, усилие противодействующей пружины должно значительно превышать силу трения.

В ряде случаев необходимо контролировать уменьшение входного параметра. Эта задача решается с помощью минимальных реле. Так, например, контакты минимального реле напряжения отключают установку при снижении напряжения сети ниже допустимого. Напряжением срабатывания $U_{ср}$ таких реле называется напряжение, при котором происходит отпускание якоря, напряжением возврата $U_в$ — напряжение, при котором якорь притягивается к полюсам электромагнита. Тогда $k_в = U_в/U_{ср} > 1$. Аналогично для реле минимального тока $k_в = I_в/I_{ср} > 1$. Коэффи-

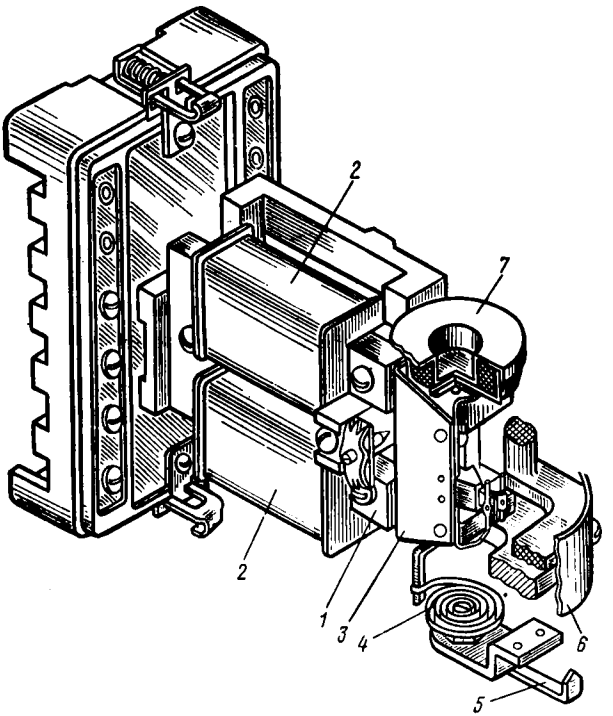


Рис. 9.5. Электромагнитное реле серии РТ-40

циент возврата может легко меняться за счет изменения конечного рабочего зазора. Рассмотрим клапанную систему (рис. 5.15). Допустим, что магнитная цепь не насыщена. Будем менять конечный зазор с помощью тонких латунных прокладок. Начальное положение якоря оставим без изменения. Поскольку начальный зазор не меняется, то и ток трогания $I_{тр}$ остается без изменения. При изменении конечного зазора $\delta_к$ сила возвратной пружины остается практически неизменной, так как ее деформация невелика, а изменение длины на долю миллиметра не изменяет усилия.

Согласно (5.57)

$$I_{отп} = \sqrt{\frac{2P_{пр,отп}}{\mu_0 S\omega^2}}\,\delta_к, \qquad (9.2)$$

где $P_{пр,отп}$ — усилие пружины в момент отпускания при $\delta = \delta_к$.

Пусть $\delta_{к1} > \delta_{к2}$, тогда

$$k_{в1} = I_{отп1}/I_{ср}; \quad k_{в2} = I_{отп2}/I_{ср}; \quad k_{в1}/k_{в2} = \delta_{к1}/\delta_{к2}.$$

Таким образом, чем больше $\delta_к$, тем выше $k_в$. Следует отметить, что при изменении $\delta_к$ и $\delta_н = \text{const}$ ток срабатывания $I_{ср}$ остается неизменным.

Если менять начальный зазор $\delta_н$ при $\delta_к = \text{const}$, то при тех же допущениях получим

$$\frac{k_{в1}}{k_{в2}} = \frac{I_{ср2}}{I_{ср1}} = \frac{\delta_{н2}}{\delta_{н1}}. \qquad (9.3)$$

С ростом начального зазора $\delta_н$ коэффициент возврата $k_в$ уменьшается.

Иногда для изменения $I_{ср}$ меняется начальная сила пружины $P_{пр,н}$. Можно показать [2.3], что с увеличением $I_{ср}$ за счет увеличения начального натяжения возвратной пружины $k_в$ уменьшается. Максимальное значение $k_в$ достигается при минимальном токе уставки.

В ряде случаев ток или напряжение отпускания реле в схемах автоматики должны быть значительно меньше тока или напряжения срабатывания. В этих схемах применяются реле с низким коэффициентом возврата.

Тяговая характеристика электромагнитов переменного тока более полога, чем электромагнитов постоянного тока, и ее легче согласовать с противодействующей. Поэтому высокий коэффициент возврата в реле переменного тока достигается легче, чем в реле постоянного тока.

9.3. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) **Реле защиты энергосистем.** В схемах защиты энергосистем и крупных силовых установок (мощных электродвигателей, трансформаторов) широко применяются реле серии РТ-40 (рис. 9.5). Магнитопровод *1* шихтуется из листов электротехнической стали. Обмотка *2* реле разбита на две секции, которые при необходимости могут быть соединены параллельно или последовательно. Якорь *3* Г-образной формы выполнен из тонкого листа электротехнической стали. С осью якоря связаны два мостиковых контакта (замыкающий и размыкающий) с серебряными накладками. Ток срабатывания регулируется изменением натяга спиральной противодействующей пружиной *4*. Натяг пружины и значение тока срабатывания (уставка) фиксируются указателем *5* по шкале *6*. За счет изменения натяга пружины уставка по току срабатывания изменяется в 4 раза. При переключении последовательного сое-

динения секций на параллельное ток срабатывания увеличивается в 2 раза.

С осью якоря связан демпфер *7* в виде тороида, заполненного кварцевым песком. При любом ускорении якоря и связанной с ним подвижной системы часть кинетической энергии тратится на преодоление сил трения между песчинками. С помощью демпфера уменьшаются вибрации как всей подвижной системы, так и контактов при их включении.

Реле выпускаются на токи от 0,2 до 200 А. Время срабатывания составляет 0,03 с при $I=3I_{ср}$. Коэффициент возврата $k_в \geqslant 0{,}7$ и уменьшается по мере увеличения силы противодействующей пружины. Потребляемая мощность при номинальной уставке от 0,2 до 8 В·А. Мощность коммутируемой цепи около 50 Вт постоянного тока при напряжении 220 В.

На базе реле серии РТ-40 выпускаются реле максимального напряжения РН-51, РН-53 и минимальные реле напряжения РН-54.

б) **Реле тока и напряжения для управления и защиты электропривода.** В качестве таких реле часто применяются реле постоянного тока серии РЭВ-300 с высоким $k_в$. Реле этой серии выпускаются и как реле напряжения, и как реле тока. На рис. 9.6 изображено токовое реле серии РЭВ-300. Магнитопровод *1* U-образной формы выполнен из прутка круглого сечения. Плоский якорь *2* вращается на призме, что обеспечивает высокую механическую износостойкость реле. Обмотка *3* выполняется из медной шины. Регулирование усилия пружины *5* осуществляется гайкой *6*. Изоляционная пластина *7* связывает якорь с подвижным контактом *8*. Реле имеет два неподвижных контакта *9* и *10*. Подвижный контакт *8* соединяется с выводом *11* с помощью гибкой связи *12*. С помощью шпилек *4* реле устанавливается на сборной панели. Высокий коэффициент возврата достигается благодаря достаточно большому (до $5\cdot10^{-3}$ м) конечному зазору и малому ходу якоря (единицы миллиметра). Уставка по току срабатывания регулируется в пределах 30—65 % $U_{ном}$ изменением начального сжатия пружины *5*. Уставка срабатывания реле напряжения меняется в пределах 30—50 % $U_{ном}$. При увеличении сжатия пружины растет напряжение трогания $U_{тр}$ и увеличивается время трогания согласно уравнению

$$t_{тр} = \frac{L_р}{R_р} \ln \frac{1}{1 - U_{тр}/U},$$

где $L_р$ — индуктивность и $R_р$ — сопротивление цепи обмотки реле; U — напряжение сети, приложенное к обмотке.

С увеличением напряжения трогания $U_{тр}$ изменяется коэффициент возврата.

Увеличение быстродействия реле напряжения достигается низким номинальным напряжением обмотки (24, 48 В) и последовательным включением добавочного резистора из константана. Добавочный рези-

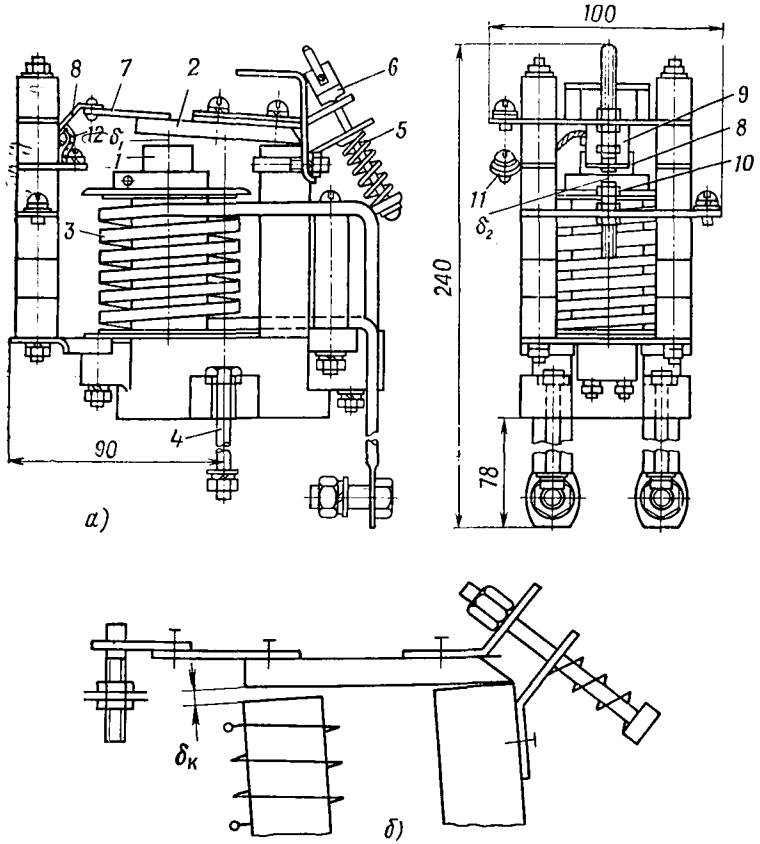


Рис. 9.6. Реле серии РЭВ-300:
а — общий вид; *б* — якорь в притянутом положении

стор позволяет увеличить напряжение срабатывания реле. Сопротивление его выбирается так, чтобы ток срабатывания лежал в пределах $0{,}3\ I_{ном} \leqslant I_{ср} \leqslant 0{,}5\ I_{ном}$. Чем больше отношение $I_{ср}/I_{ном}$, тем больше время срабатывания.

Включение добавочного резистора из константана уменьшает зависимость напряжения срабатывания от температуры.

Коэффициент возврата реле регулируется изменением конечного зазора (рис. 9.6, *б*). Регулировка конечного зазора $\delta_к$ и хода якоря осуществляется изменением положения неподвижных контактов *10*, *9*. При

подъеме контакта *10* зазор $\delta_к$ увеличивается. При опускании контакта *9* уменьшается ход якоря. Минимальное значение зазора $\delta_2 = 1{,}5$ мм.

в) **Реле защиты электропривода.** На рис. 9.7 представлена упрощенная схема защиты двигателя постоянного тока с помощью реле максимального тока. Рубильники *Q1* и *Q2* подключают цепь якоря к питающей сети, а рубильники *Q3* и *Q4* подают напряжение на цепь управления (контактора *КМ*). При коротком замыкании в обмотке якоря двигателя *М* срабатывает максимальное реле *КА* и размыкает свои контакты в цепи катушки контактора *КМ*. При этом обесточивается цепь якоря двигателя. Так как ток в якоре стал равным нулю, реле *КА* отпускает, контакты его замыкаются и цепь катушки контактора подготавливается к следующему включению.

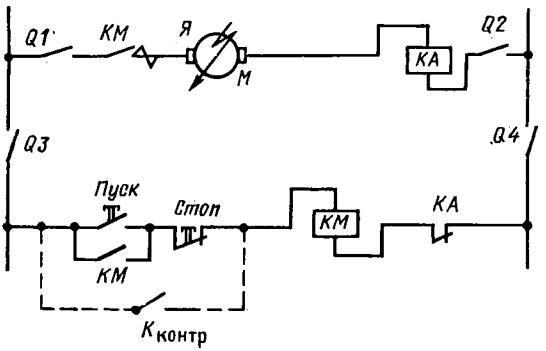


Рис. 9.7. Схема включения реле максимального тока

При отключении контактора его блок-контакт *КМ* размыкается, поэтому при замыкании контактов *КА* контактор *КМ* не включится вновь. Характерным для схемы является полное обесточивание реле *КА* за счет отпускания контактора. Поэтому $k_в$ реле может быть невысоким.

В ряде схем управления вместо кнопок используется командоконтроллер $К_{контр}$. В этом случае после обесточивания якоря и реле *КА* его контакты снова включают катушку контактора *КМ*. Произойдет повторное включение двигателя при КЗ якоря, после чего снова последует отключение двигателя, и т. д. В результате поврежденный двигатель будет многократно включаться в сеть. В связи с этим реле снабжаются специальным устройством, предотвращающим возврат реле в исходное состояние после прекращения тока в катушке (рис. 9.8). Возврат реле в исходное положение после срабатывания возможен либо вручную, либо с помощью специального электромагнита (дистанционный возврат). Такие реле, называемые реле без самовозврата, рассмотрены ниже.

Основными требованиями, предъявляемыми к реле защиты электро-

привода являются высокое быстродействие ($t_{ср} \leqslant 0{,}05$ с), широкая регулировка тока срабатывания, вибро- и ударостойкость.

На рис. 9.8 показано токовое реле серии РЭВ, предназначенное для работы в электроприводах переменного тока. Эти реле используются для защиты от токов КЗ, а в совокупности с реле времени — для защиты от токовых перегрузок. Реле могут использоваться как промежуточные. Токовые реле в исходном положении работают с разомкнутой магнитной системой без короткозамкнутого витка на полюсе. Реле напряжения, как правило, реагируют на исчезновение напряжения питания. Поэтому в исходном положении реле якорь длительно находится в притянутом положении. Для устранения вибрации якоря на полюсный наконечник устанавливается короткозамкнутый виток.

Катушки токовых реле выполняются на номинальные токи от 2,5 до 600 А. Регулирование уставки по току срабатывания производится изменением натяжения возвратной пружины и находится в пределах от 110 до 700 % $I_{ном}$. Реле напряжения допускают регулировку уставки по напряжению срабатывания от 70 до 85 % номинального. Коэффициент возврата токовых реле лежит в пределах 0,2—0,4. Реле имеют как замыкающие, так и размыкающие контакты и выпускаются с самовозвратом и без самовозврата с ручным приводом защелки. Реле без самовозврата имеет неуравновешенную защелку, левая часть которой тяже-

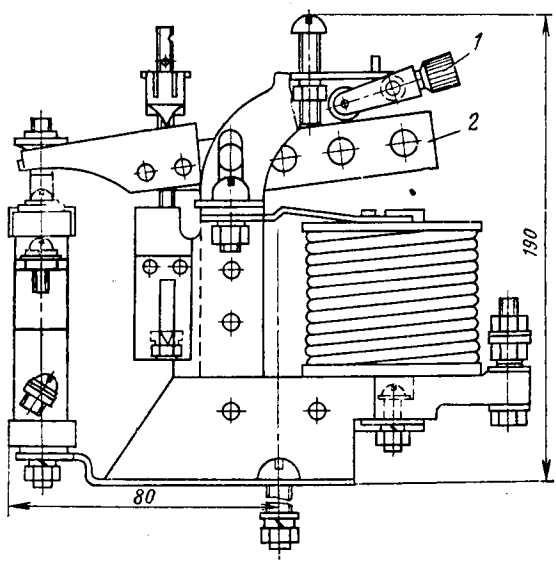


Рис. 9.8. Токовое реле переменного тока без самовозврата

лее правой. При притяжении якоря защелка *1* под действием силы тяжести поворачивается против часовой стрелки и запирает якорь *2* в притянутом положении. Для возврата якоря вручную необходимо нажать на головку защелки.

Время срабатывания реле серии РЭВ 0,06, время отпускания 0,07 с.

9.4. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

В поляризованных реле кроме основного потока, создаваемого катушкой, действует дополнительный поляризующий магнитный поток, который создается установленным в реле постоянным магнитом. Благодаря поляризующему потоку направление электромагнитного усилия, действующего на якорь, изменяется в зависимости от направления тока в катушке.

На рис. 9.9 показаны возможный вариант выполнения магнитной системы поляризованного реле и схема замещения его магнитной цепи.

Потоки постоянного магнита в зазорах δ_1 и δ_2

$$\Phi_{м1} = \frac{F_м}{R_{\delta 1} + R_\delta}; \quad \Phi_{м2} = \frac{F_м}{R_{\delta 2} + R_\delta}, \tag{9.4}$$

где $F_м$ — МДС постоянного магнита; $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ — магнитные сопротивления зазоров δ_1 и δ_2; R_δ — магнитное сопротивление паразитного зазора δ, обусловленного конструкцией магнитопровода.

Магнитный поток, создаваемый катушкой,

$$\Phi_к = \frac{F_к}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}}, \tag{9.5}$$

где $F_к$ — МДС катушки.

Результирующее усилие, действующее на якорь, равно разности усилий, создаваемых в зазорах δ_1 и δ_2. Воспользовавшись (5.52), получим

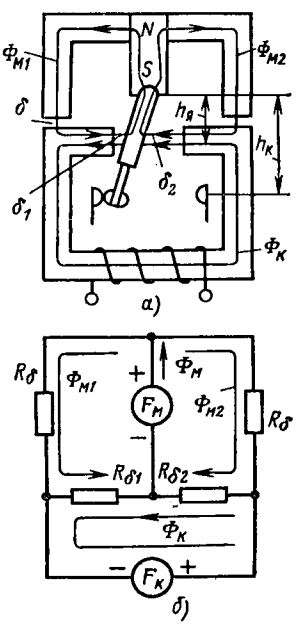


Рис. 9.9. Поляризованное реле:

а — магнитная система; *б* — схема замещения магнитной цепи

$$P_{\text{я,рез}} = P_{\delta 1} - P_{\delta 2} = \frac{1}{2\mu_0 S_{\text{п}}} [(\Phi_{\text{м1}} - \Phi_{\text{к}})^2 - (\Phi_{\text{м2}} + \Phi_{\text{к}})^2], \tag{9.6}$$

где $S_{\text{п}} = S_{\delta 1} = S_{\delta 2}$ — площадь рабочего зазора.

Срабатывание реле происходит при

$$P_{\text{я,рез}} < 0. \tag{9.7}$$

Для определения потока срабатывания $\Phi_{\text{к,ср}}$, создаваемого катушкой, воспользуемся предельным случаем, когда перед изменением знака усилие проходит через нулевое значение. Из (9.6) и (9.7)

$$(\Phi_{\text{м1}} + \Phi_{\text{м2}})(\Phi_{\text{м1}} - \Phi_{\text{м2}} - 2\Phi_{\text{к,ср}}) = 0.$$

Поскольку $\Phi_{\text{м1}} + \Phi_{\text{м2}} \neq 0$, то

$$\Phi_{\text{к,ср}} = \frac{\Phi_{\text{м1}} - \Phi_{\text{м2}}}{2}. \tag{9.8}$$

Тогда из (9.4) — (9.6) получим

$$F_{\text{к,ср}} = \frac{1}{2} F_{\text{м}} \frac{\delta_2^2 - \delta_1^2}{(\delta + \delta_1)(\delta + \delta_2)}. \tag{9.9}$$

Если значения δ_1 и δ_2 близки, то МДС срабатывания очень мала. Благодаря этому мощность срабатывания поляризованных реле снижается до 10^{-6} Вт. Следует отметить, что сила контактного нажатия $P_{\text{к}}$ определяется разностью значений δ_1 и δ_2.

Из рис. 9.9 следует

$$P_{\text{к}} = P_{\text{я}} \frac{h_{\text{я}}}{h_{\text{к}}} = \frac{1}{2\mu_0 S_{\text{п}}} (\Phi_{\text{м1}}^2 - \Phi_{\text{м2}}^2) \frac{h_{\text{я}}}{h_{\text{к}}}.$$

Чем ближе значения δ_1 и δ_2, тем ближе значения $\Phi_{\text{м1}}$ и $\Phi_{\text{м2}}$ и тем меньше контактное нажатие, которое обычно не превышает $(1 \div 5)\,10^{-2}$ Н.

Контактные системы могут иметь различные исполнения (рис. 9.10). При подаче в обмотку реле тока такого направления, что поляризующий поток и поток катушки складываются у правого рабочего зазора (рис. 9.10, *а*), происходит размыкание левого контакта и замыкание правого.

При отключении тока снова замыкается левый контакт (однопозиционная настройка с преобладанием). На рис. 9.10, *б* показана система с двухпозиционной настройкой. Здесь $\delta_{\text{к1}}$ и $\delta_{\text{к2}}$ — расстояние неподвижных контактов от осевой линии симметрии реле. Положение контактов зави-

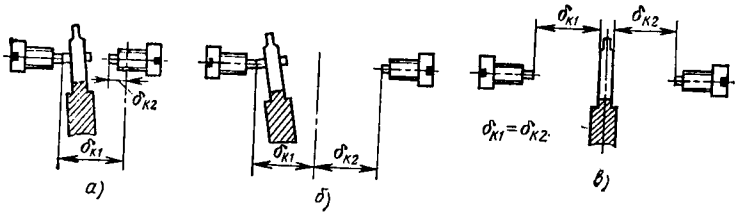


Рис. 9.10. Исполнения контактных систем поляризованного реле

сит от полярности предыдущего импульса тока. Якорь, укрепленный на плоской пружине (рис. 9.10, *в*), при обесточенной обмотке находится в нейтральном (среднем) положении. В зависимости от полярности тока катушки замыкается левый или правый контакт. После отключения тока якорь возвращается в нейтральное положение.

В практике наиболее широко распространены реле типа РП, допускающие частоту переключений до 200 в секунду при МДС срабатывания 1,5—2 А. Контактное нажатие при отсутствии тока в обмотке составляет $(1 \div 5) \times \times 10^{-2}$ Н, длительный ток контактов 0,2 А, напряжение коммутируемой цепи 24 В.

Поляризованные электромагнитные реле имеют следующие преимущества перед нейтральными:

1. Выходной параметр (состояние контактной системы) зависит от полярности управляющего импульса, что расширяет функциональные возможности реле.

2. Реле могут управляться кратковременными импульсами тока.

3. Замкнутое состояние контактов сохраняется после окончания управляющего импульса, что позволяет использовать реле как элемент памяти.

4. После срабатывания не потребляется мощность для удержания якоря в притянутом положении.

5. Высокая чувствительность и высокий коэффициент усиления по мощности.

6. За счет положения упоров можно осуществлять однопозиционную, нейтральную и двухпозиционную настройку реле.

Развитие конструкции электромагнитных и поляризованных реле идет в направлении уменьшения массы, размеров, увеличения надежности и удобства монтажа на платах. Микроминиатюризация элементов автоматики привела к созданию электромагнитных реле с улучшенными мас-

согабаритными характеристиками и повышенной долговечностью. Микроминиатюрные реле [9.6] имеют магнитные и контактные системы, располагаемые в герметичном кожухе, заполненном сжатым сухим чистым воздухом или с примесью гелия. Внутренние компоненты реле выполняются из материалов, которые в процессе длительной эксп-

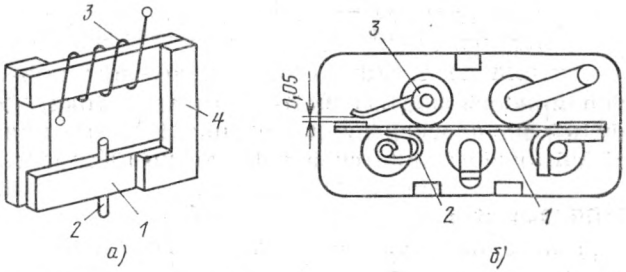


Рис. 9.11. Реле РЭС-49:
а — магнитная система; *б* — контактная система

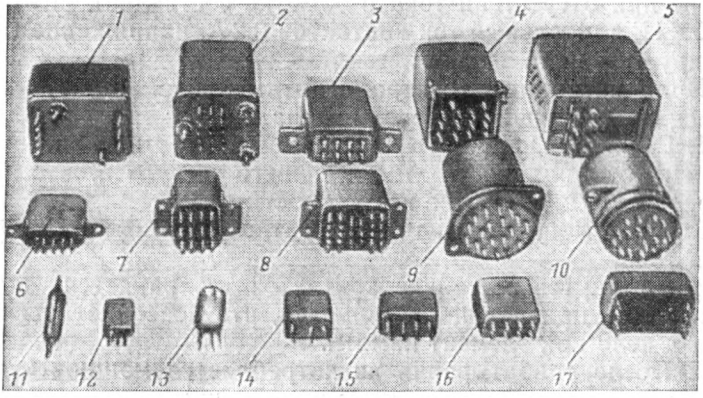


Рис. 9.12. Внешний вид отдельных конструкций малогабаритных реле:

1 — поляризованное (РПС-18); *2* — клапанного типа с уравновешенным якорем с двойной герметизацией и двойными контактами; *3* и *4* — малогабаритные герметичные средней мощности на два и четыре переключения (РЭН-34 и РЭН-33); *5* — негерметичное средней мощности на шесть переключений; *6—8* — так называемые дистанционные переключатели на два, четыре и шесть переключений (РПС-32, РПС-34 и РПС-36); *9* — герметичное соленоидного типа с шестью группами на переключение (РЭС-39); *10* — герметичное с поворотным якорем (РЭС-8); *11* — типа РЛ-1 с герконом; *12* — миниатюрное нейтральное с поворотным якорем (РЭС-49); *13* — малогабаритное клапанного типа (РЭС-15); *14* — малогабаритное клапанного типа с двойной герметизацией и двойными контактами (РЭС-34); *15* — малогабаритное нейтральное с двумя группами на переключение (РЭС-34); *16* — реле с тремя замыкающими герконами (РЭС 44); *17* — реле типа (РЭС-44) с герконом

луатации не выделяют паров газов. Штыревые выводы легко впаиваются в монтажные плиты. Примером таких реле является РЭС-49. Масса реле 3,5 г, размеры 10×5,2×22,8 мм. Реле имеет один переключающий контакт с коммутируемым током 1 А при напряжении 36 В. На рис. 9.11, *а* представлена его магнитная система. Плоский якорь *1* вращается на оси *2*, воздействуя на подвижный контакт. Неподвижные полюсы системы образованы пластинами *4*. МДС создается обмоткой *3*. На рис. 9.11, *б* показана контактная система реле. Размыкающий контакт образуется пластиной *1*, на которую действует якорь, и контактом *2*, замыкающий — пластиной *1* и контактом *3*. На рис. 9.12 представлен внешний вид некоторых малогабаритных реле.

9.5. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

а) **Принцип действия.** Долговечность энергетического оборудования в значительной степени зависит от перегрузок, которым оно подвергается во время работы. Для любого объекта можно найти зависимость допустимой длительности протекания тока от его значения, при котором обеспечивается надежная и длительная его эксплуатация (кривая *1* на рис. 9.13). При номинальном токе допустимая длительность его протекания стремится к бесконечности. Протекание тока, превышающего номинальный, приводит к дополнительному повышению температуры и дополнительному старению изоляции. Поэтому чем больше ток перегрузки, тем меньше должна быть ее длительность. Кривая *1* на рис. 9.13 устанавливается исходя из необходимого срока службы оборудования. Чем меньше срок службы, тем бóльшие перегрузки допустимы.

Для защиты энергетического оборудования от токовых перегрузок широко распространены тепловые реле с биметаллическим элементом.

Очевидно, что в идеальном случае зависимость $t_{ср}(I)$ для реле защиты должна идти чуть ниже кривой *1* на рис. 9.13.

Биметаллический элемент со-

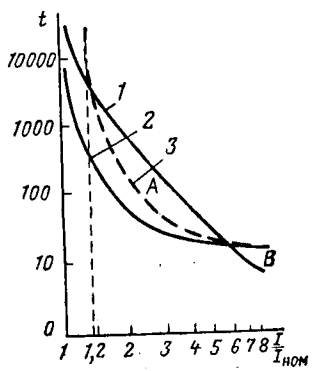


Рис. 9.13. Времятоковые характеристики теплового реле и защищаемого объекта

стоит из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения α. В месте прилегания друг к другу пластины жестко скреплены за счет проката в горячем состоянии, либо сваркой. Если такой элемент закрепить неподвижно и нагреть, то произойдет его изгиб в сторону материала с меньшим α. Максимальный прогиб элемента [3.1]

$$x_{max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2)\frac{l^2\tau}{\delta}, \qquad (9.10)$$

где α_1 — температурный коэффициент расширения термоактивного материала (с большим значением α); α_2 — температурный коэффициент расширения термореактивного материала (с меньшим значением α); δ — суммарная толщина биметаллического элемента; l — его длина; τ — превышение температуры биметаллического элемента относительно окружающей среды.

Незакрепленный конец элемента развивает усилие

$$P = \frac{3}{16}(\alpha_1 - \alpha_2)\frac{b\delta^2}{l}E\tau, \qquad (9.11)$$

где b — ширина элемента; $E = (E_1 + E_2)/2$ — средний модуль упругости материала элемента.

Из (9.10) и (9.11) видно, что значение прогиба и усилия тем больше, чем больше разность $\alpha_1 - \alpha_2$.

Широкое распространение в тепловых реле получили такие материалы, как инвар (малое значение α) и хромоникелевая сталь (большое значение α).

Для получения большего прогиба необходим элемент большой длины и малой толщины. В то же время при необходимости получения большого усилия целесообразно иметь широкий элемент с малой длиной и большой толщиной.

При работе в компонентах биметаллической пластины возникают напряжения сжатия и растяжения, которые не должны превышать допустимых значений.

Нагрев биметаллического элемента может производиться за счет тепла, выделяемого током нагрузки в самой пластине или в специальном нагревателе. Лучшие характеристики получаются при комбинированном нагреве, когда пластина нагревается и за счет проходящего через нее тока, и за счет тепла, выделяемого специальным нагревателем, обтекаемым тем же током нагрузки.

Основной характеристикой теплового реле является зависимость времени срабатывания от тока нагрузки (времятоковая характеристика). До начала перегрузки через

биметаллическую пластину протекает ток I_0, который нагревает ее до температуры Θ_0. Зависимость времени срабатывания от тока для этого случая имеет вид

$$t_{ср} = T \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_\infty^2}, \qquad (9.12)$$

где T — постоянная времени нагрева реле; I_0 — ток предварительной нагрузки, протекающий через элемент; I_∞ — ток, при котором реле срабатывает за время $t \gg T$; I — ток, при котором реле срабатывает за время $t_{ср}$.

Выразив токи в относительных единицах: $x = I/I_{ном}$; $x_{ср} = I_\infty/I_{ном}$; $\varepsilon = I_0/I_{ном}$, получим

$$t_{ср} = T \ln \frac{x^2 - \varepsilon^2}{x^2 - x_{ср}^2}. \qquad (9.13)$$

Если реле включается в холодном состоянии ($\varepsilon = 0$), то

$$t_{ср} = T \ln \frac{x^2}{x^2 - x_{ср}^2}. \qquad (9.14)$$

На рис. 9.14 изображены зависимости $t_{ср} = f(x)$ для случая $\varepsilon = 0$ (кривая *1*) и $\varepsilon \neq 0$ (кривая *2*).

При КЗ нагрев биметаллического элемента идет без отдачи тепла и время срабатывания

$$t_{ср} = T x_{ср}^2 / x^2.$$

Из-за инерционности теплового процесса тепловые реле, имеющие такой биметаллический элемент, непригодны для защиты цепей от КЗ. Нагревательные элементы в данном случае могут перегореть до срабатывания реле. Поэтому защита с помощью таких реле должна быть дополнена электромагнитными реле, предохранителями или автоматическими выключателями.

Для оценки эффективности защиты строятся времятоковые характеристики защищаемого объекта и биметаллического эле-

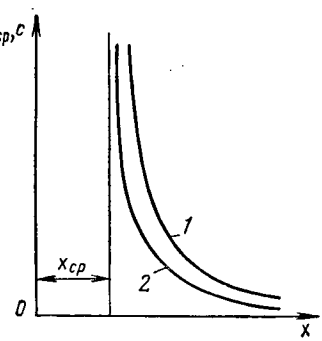


Рис. 9.14. Характеристики теплового реле:
1 — при $\varepsilon = 0$; *2* — при $\varepsilon = 1$

мента теплового реле. Для построения этих характеристик, называемых защитными, используются паспортные или расчетные данные. Ток $I_{ср}$ реле составляет $(1{,}2 \div 1{,}3)\ I_{ном}$. Защитные характеристики биметаллического элемента строятся для $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = 1$. При правильном выборе реле времятоковая характеристика при $\varepsilon = 0$ должна проходить вблизи и ниже характеристики защищаемого объекта. Тогда при предварительном подогреве номинальным током реле обеспечивает надежную защиту. На рис. 9.13 представлены времятоковые характеристики двигателя (кривая *1*) и двух тепловых реле с различными токами срабатывания. У одного реле (кривая *2*) ток срабатывания равен номинальному току двигателя, у другого на 20 % больше (кривая *3*). Лучшее согласование характеристик реле и двигателя во втором случае.

Необходимо отметить, что постоянная времени нагрева защищаемого объекта (например, двигателя) зависит от длительности перегрузки. При кратковременных перегрузках в нагреве участвует только обмотка двигателя и постоянная времени невелика (5—10 мин) ввиду относительно малой массы обмотки. При длительной перегрузке в нагреве участвует вся масса двигателя. Постоянная времени нагрева для мощных двигателей — 40—60 мин. Для совершенной защиты необходимо, чтобы постоянная времени нагрева реле была такой же, как и у защищаемого объекта. Это удается в том случае, если реле разрабатывается для защиты конкретного двигателя. На практике разработка теплового реле для каждого типа двигателя нецелесообразна и одно и то же реле используется для защиты двигателей различной конструкции. При этом обеспечить надежную защиту во всем диапазоне перегрузок не удается.

Для быстродействующей защиты объекта и реле целесообразно биметаллический элемент объединять с электромагнитным, имеющим большой ток срабатывания при малом времени срабатывания.

Номинальный ток реле выбирается равным номинальному току защищаемого объекта. Срабатывание реле происходит при $(1{,}2 \div 1{,}3)\ I_{ном}$. Время срабатывания 20 мин.

Температура биметаллического элемента зависит от температуры окружающей среды, с ростом которой ток срабатывания реле уменьшается. Для номинальной температуры $\Theta_{ном}$ окружающей среды (обычно 40 °С) на основании (2.16) можно записать

$$I^2_{ср.ном} = a\,(\Theta_{ср} - \Theta_{ном}), \qquad (9.15)$$

где $I_{ср,ном}$ — ток срабатывания реле при номинальной температуре $\theta_{ном}$; a — конструктивный параметр, зависящий от размеров, материала и коэффициента теплоотдачи биметаллического элемента; $\Theta_{ср}$ — температура биметаллического элемента, при которой срабатывает реле.

При температуре, отличной от номинальной,

$$I_{ср}^2 = a(\Theta_{ср} - \Theta). \qquad (9.16)$$

Воспользовавшись (9.15) и (9.16), можно получить

$$I_{ср} = I_{ср,ном}\sqrt{\frac{\Theta_{ср} - \Theta}{\Theta_{ср} - \Theta_{ном}}}. \qquad (9.17)$$

При температуре окружающей среды Θ, сильно отличающейся от номинальной, необходимы либо дополнительная (плавная) регулировка реле, либо подбор нагревательного элемента с учетом этой температуры. Для того чтобы температура окружающей среды меньше влияла на ток срабатывания, значение $\Theta_{ср}$ необходимо выбирать возможно большим. Тепловые реле желательно располагать в одном помещении с защищаемым объектом. Нельзя располагать реле вблизи концентрированных источников тепла — нагревательных печей, систем отопления и т. д. Эти ограничения не относятся к реле с температурной компенсацией.

б) **Конструкция тепловых реле.** Любые тепловые воздействия инерционны по своей природе, и прогиб биметаллической пластины происходит медленно. Если с пластиной непосредственно связать подвижный контакт, то малая скорость его движения не обеспечивает гашение дуги при отключении цепи. Поэтому воздействие пластины на контакт передается, как правило, через ускоряющие устройства, наиболее совершенным из которых является «прыгающий» контакт (рис. 9.15). В холодном состоянии биметаллическая пластина *3* занимает крайнее левое положение. Пружина *1* создает силу P, которая замыкает контакты *2*. При нагреве пластины *3* она изгибается вправо (по стрелке). В момент, когда пластина *3* направлена на центр *0*, пружина *1* развивает максимальную силу. При дальнейшем нагреве пружина *1* быстро переходит в крайнее правое положение и контакты *2* размыкаются с большой скоростью, обеспечивая надежное гашение дуги.

Современные контакторы и магнитные пускатели комплектуются с однофазными (ТРП) или двухфазными (ТРН) тепловыми реле. Реле типа ТРП (рис. 9.16) имеет комбинированную систему нагрева. Биметаллическая пластина *1* нагревается как за счет прохождения через нее тока, так и за счет нагревателя *5*. При прогибе конец биметаллической

пластины воздействует на прыгающий контактный мостик *3*. Реле допускает плавную ручную регулировку тока срабатывания в пределах ±25 % номинального тока уставки. Эта регулировка осуществляется ручкой *2*, меняющей первоначальную деформацию биметаллической пластины. Возврат реле в исходное положение после срабатывания производится кнопкой *4*. Возможно исполнение и с самовозвратом после остывания биметалла. Высокая температура срабатывания (выше 200 °С) уменьшает зависимость работы реле от температуры окружающей среды. Уставка меняется на 5 % при изменении температуры окружающей среды на 10 °С. Реле обладает высокой ударо- и вибростойкостью.

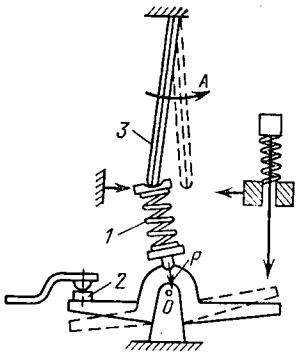


Рис. 9.15. Прыгающий контакт теплового реле

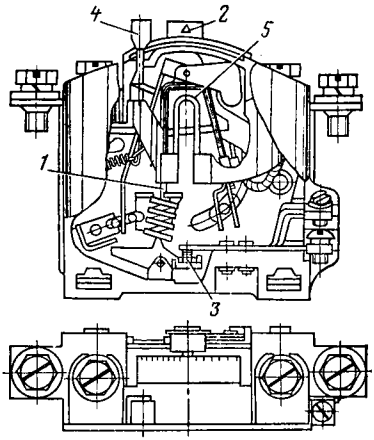


Рис. 9.16. Однофазное тепловое реле ТРП

9.6. ПОЗИСТОРНАЯ ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ

Сложность конструкции тепловых реле, трудности при согласовании характеристик реле и защищаемого объекта, недостаточно высокая надежность систем защиты на их основе привели к созданию тепловой защиты, реагирующей непосредственно на температуру защищаемого объекта. При этом датчики температуры устанавливаются на обмотке двигателя. В качестве датчиков температуры получили применение термисторы и позисторы. Термисторы представляют собой резисторы с довольно большим отрицательным ТКС. При увеличении температуры сопротивление термистора уменьшается, что используется для схемы отключения двигателя. Для увеличения крутизны за-

висимости сопротивления от температуры термисторы, наклеенные на три фазы, включаются параллельно (рис. 9.17, *а*).

Позисторы являются нелинейными резисторами с положительным ТКС. При достижении определенной температуры Θ сопротивление позистора скачкообразно увеличивается на несколько порядков. Для усиления этого эффекта позисторы разных фаз соединяются последовательно. Характеристика позисторов показана на рис. 9.17, *б*.

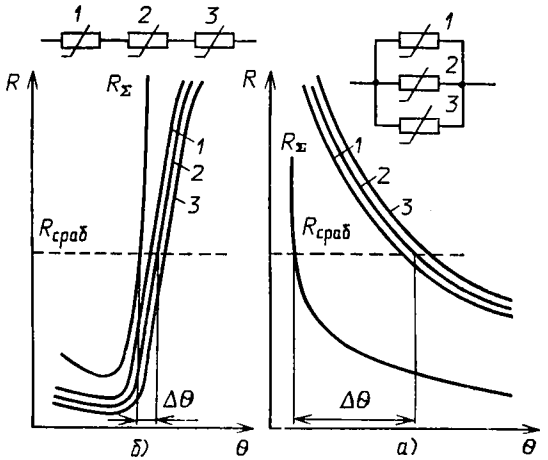


Рис. 9.17. Зависимость сопротивления позисторов и термисторов от температуры:

а — последовательное соединение позисторов; *б* — параллельное соединение термисторов

Защита с помощью позисторов является более совершенной. В зависимости от класса изоляции обмоток двигателя берутся позисторы на температуру срабатывания Θ=105, 115, 130, 145 и 160 °С. Эта температура называется классификационной. Позистор резко меняет сопротивление при температуре Θ+20 °С за время не более 12 с. При температуре Θ—5 °С сопротивление трех последовательно включенных позисторов должно быть не более 1650 Ом, при температуре Θ+15 °С их сопротивление должно быть не менее 4000 Ом.

Гарантийный срок службы позисторов 20 000 ч. Кон-

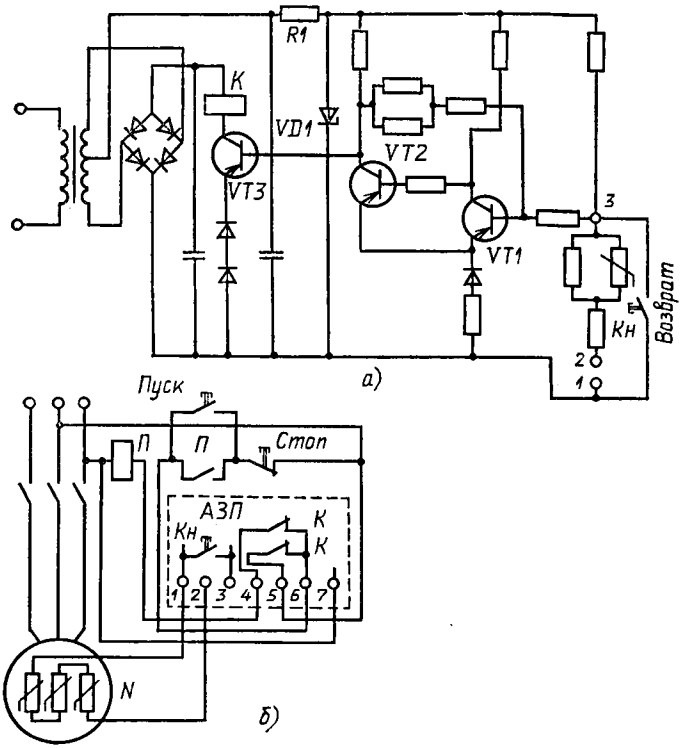


Рис. 9.18. Аппарат позисторной защиты с ручным возвратом:
а — принципиальная схема; *б* — схема подключения к двигателю

структивно позистор представляет собой диск диаметром 3,5 мм и толщиной 1 мм, покрытый кремнеорганической эмалью, создающей необходимую влагостойкость и электрическую прочность изоляции. Вопросы позисторной защиты рассмотрены в [9.3].

Рассмотрим схему позисторной защиты, показанную на рис. 9.18. К контактам *1, 2* схемы (рис. 9.18, *а*) подключаются позисторы, установленные на всех трех фазах двигателя (рис. 9.18, *б*). Транзисторы *VT1, VT2* включены по схеме триггера Шмидта и работают в ключевом режиме. В цепь коллектора транзистора *VT3* оконечного каскада включено выходное реле *К*, которое воздействует на обмотку пускателя.

При нормальной температуре обмоток двигателя и связанных с ними позисторов сопротивление последних мало. Сопротивление между точками *1—2* схемы также мало, транзистор *VT1* закрыт (на базе малый отрицательный потенциал), а транзистор *VT2* открыт (на базе большой отрицательный потенциал). Отрицательный потенциал на коллекторе транзистора *VT3* мал, и он закрыт. При этом ток в обмотке реле *К* недостаточен для его срабатывания. При нагреве обмотки двигателя сопротивление позисторов увеличивается, и при определенном значении этого сопротивления отрицательный потенциал точки *3* достигает напряжения срабатывания триггера. Релейный режим триггера обеспечивается эмиттерной обратной связью (сопротивление в цепи эмиттера *VT1*) и коллекторной обратной связью между коллектором *VT2* и базой *VT1*. Работа транзисторных усилителей в релейном режиме рассмотрена в гл. 12. При срабатывании триггера транзистор *VT2* закрывается, а транзистор *VT3* открывается. Срабатывает реле *К*, замыкая цепи сигнализации и размыкая цепь электромагнита пускателя, после чего обмотка статора отключается от напряжения сети.

После охлаждения двигателя его пуск возможен после нажатия кнопки «Возврат», при котором триггер возвращается в начальное положение.

В современных электродвигателях позисторы защиты устанавливаются на лобовой части обмоток двигателя. В двигателях прежних разработок позисторы можно приклеивать к лобовой части обмоток.

9.7. ВЫБОР РЕЛЕ

а) **Выбор максимально-токовых реле (КА).** Данные, указанные в паспортах реле и защищаемого объекта, должны обеспечивать неравенство $I_{ном,р} \geqslant I_{ном,дв}$, где $I_{ном,р}$ и $I_{ном,дв}$ — номинальные токи реле и защищаемого двигателя. Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме $I_{ном,дв} = I_{ном,дв\ 25}$, где $I_{ном,дв\ 25}$ — номинальный ток двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме при ПВ = 25 %. Схема включения КА приведена на рис. 9.19, *а*.

Уставка реле по току срабатывания должна быть $I_{уст} \geqslant (1{,}3 \div 1{,}5) I_{пуск}$, где $I_{пуск}$ — пусковой ток двигателя. Для защиты двигателей с фазным ротором ток срабатывания выбирается из условия $I_{уст} \geqslant (2{,}25 \div 2{,}5) I_{ном,дв}$.

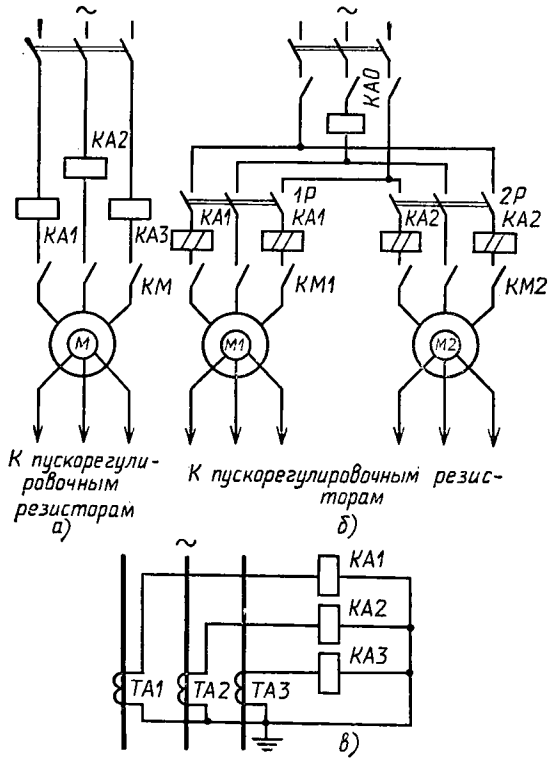


Рис. 9.19. Схемы включения максимально-токовых реле

Если несколько двигателей с фазным ротором питаются через общий ввод (рис. 9.19, *б*), уставка реле *КА1* и *КА2* должна быть $I_{уст} \geqslant (2{,}25 \div 2{,}5) I_{ном,дв}$. Уставка реле *КА0* составляет

$$I_{уст} = (1{,}25 \div 1{,}5)\, I'_{ном,дв25} + \Sigma I_{ном,дв25},$$

где $I'_{ном,дв25}$ — номинальный ток двигателя наибольшей мощности (режим ПВ = 25 %); $\Sigma I_{ном,дв\,25}$ — сумма номинальных токов всех двигателей, защищаемых *КА0*. Если двигатели включаются на длительный режим, то принимается $I_{ном,дв} = I_{ном,дв\,25}$. Коммутационная способность КА должна соответствовать номинальным значениям тока и напряжения катушек контакторов *КМ*, *КМ1*, *КМ2*, в це-

пи которых включены реле. При выборе КА следует учитывать, что пусковой ток электромагнита контактора может быть в 10—15 раз больше установившегося значения и что этот ток контакты КА должны отключать. Ток отключения реле $I_{\text{отк,р}} \geqslant I_{\text{кат}}$ — тока катушки контактора (см. табл. 8.3).

Если токи цепи двигателей достаточно велики, то реле защиты включается в цепь с помощью трансформаторов тока ТА (рис. 9.19, *в*).

Для того чтобы защитить двигатель при затянувшемся пуске (велика нагрузка на валу) или кратковременной пиковой перегрузке, КА воздействует на контактор через реле времени *КТ* (рис. 9.20), которое запускается с помо-

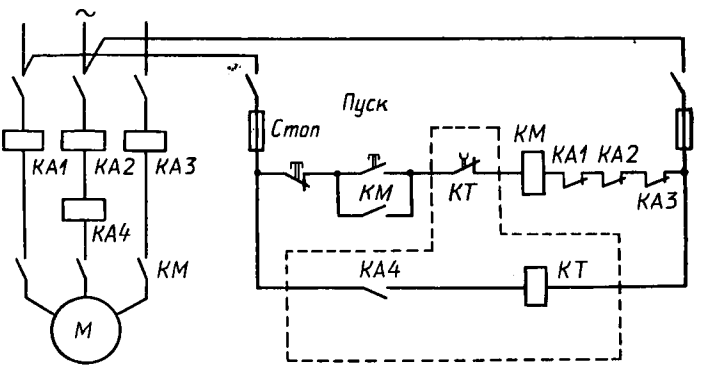


Рис. 9.20. Схема максимальной токовой защиты с реле времени

щью реле *КА4*. При нормальном пуске или кратковременной перегрузке, безопасной для двигателя, время пуска или перегрузки меньше времени выдержки $t_{\text{КТ}}$ и контактор *КМ* в цепи двигателя *М* не отключается. При этом реле *КА4* отпадает и снимает напряжение с реле *КТ*. Если время пуска или перегрузки $t_{\text{пуск}} > t_{\text{КТ}}$, то контакты *КТ* размыкаются, контактор *КМ* отключается и двигатель *М* обесточивается. Такая же схема может использоваться в схемах реверса двигателя.

Ток уставки реле *КА4* выбирается по условию $I_{\text{уст}} \leqslant 0{,}75 I_{\text{пуск}}$.

Ток возврата реле должен быть больше номинального тока двигателя на 30 %. Номинальные токи реле и двигателя должны удовлетворять условию $I_{\text{ном,р}} \leqslant I_{\text{ном,дв}}$.

б) **Выбор тепловых реле.** Применение тепловых реле целесообразно при длительности включения двигателя, превышающей 30 мин. Номинальным напряжением реле считается наибольшее из номинальных напряжений сети, при котором реле может применяться. Номинальным током реле и нагревателя является наибольший ток, длительное протекание которого не вызывает срабатывания реле. За номинальный ток уставки принимается наибольший ток, при протекании которого реле не срабатывает при данном положении регулирующего устройства. Существуют реле без регулировки, в которых согласование реле и двигателя производится выбором номинального тока $I_{ном,нагр}$ нагревателя на ток, равный номинальному току двигателя:

$$I_{ном,нагр} = I_{ном,дв}. \qquad (9.18)$$

Промышленностью выпускаются реле ТРП, ТРН, ТРТ и др., в которых номинальный ток уставки регулируется в пределах $(0{,}75 \div 1{,}25) I_{ном,нагр}$. Реле не срабатывают при пуске двигателя и кратковременных толчках нагрузки и срабатывают за время не более 10—20 мин при 20 %-ной перегрузке.

Работа теплового реле зависит от условий его охлаждения. Чем хуже условия охлаждения, тем ниже ток срабатывания. Температура Θ окружающей среды учитывается по формуле

$$I_{ном,нагр\Theta} = I_{ном,нагр}\left(1 - \frac{\delta}{100}\,\frac{\Theta - \Theta_{ном,окр}}{10}\right),$$

где δ — коэффициент, учитывающий изменение номинального тока нагревателя на каждые 10 °С разности $\Theta - \Theta_{ном,окр}$, %.

Этот коэффициент следует брать из паспорта реле; $\Theta_{ном,окр}$ — номинальная температура окружающей среды. Принимая $I_{ном,нагр} = I_{ном,дв}$, получим

$$I_{ном,нагр\Theta} = \frac{I_{ном,дв}}{1 - \frac{\delta}{100}\,\frac{\Theta - \Theta_{ном,окр}}{10}}. \qquad (9.19)$$

Если реле находится на открытом воздухе, например вне кожуха пускателя, то номинальный ток нагревателя берется на 15—20 % меньше, чем по (9.18) и (9.19).

Тепловые реле в большинстве случаев не защищают цепь от КЗ и требуют для своей защиты установки пред-

охранителей или защиты с помощью электромагнитных реле или автоматов.

в) **Защита двигателей от снижения напряжения.** При КЗ в сети напряжение на двигателях уменьшается, а ток в статоре возрастает. Если КЗ длится 0,03—0,05 с, то, как правило, линейные контакторы и магнитные пускатели не успевают отключить двигатель от сети, а частота его вращения практически не меняется.

При перерыве в подаче электроэнергии более 0,5 с происходит отключение двигателей у неответственных потребителей, причем после восстановления напряжения их

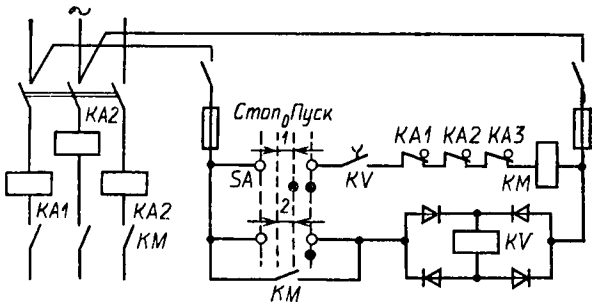


Рис. 9.21. Схема защиты двигателя при исчезновении напряжения

повторное включение произойти не должно. Это связано с тем, что одновременный самозапуск большого числа асинхронных двигателей приводит к значительному снижению сетевого напряжения, что затрудняет самозапуск двигателей у ответственных потребителей. В ряде случаев неконтролируемый самозапуск двигателей должен быть исключен по условиям технологического процесса.

Для защиты от понижения напряжения применяют электромагнитные реле напряжения. При понижении напряжения сети такое реле размыкает свой контакт в цепи катушки контактора КМ, который отключает двигатель от сети, и он останавливается. В том случае, когда необходим самозапуск при условии, что длительность перерыва энергоснабжения не превышает 0,5 с, применяется схема рис. 9.21. Запуск производится с помощью переключателя *SA*. Переключатель имеет два контакта: контакт *1* замыкается при переводе рукоятки в положение «Пуск» и остается замкнутым при ее возврате в положение *0*. При

повороте рукоятки в положение «Стоп» контакт *1* размыкается и остается разомкнутым при ее переводе в положение *0*. В положении «Пуск» рукоятки контакт *2* переключателя замыкается и подается напряжение на реле *KV*. Контактами *KV* подается питание на контактор *KM*, который включается и запускает двигатель. После включения контактора *KM* замыкается его вспомогательный контакт *KM*, который подает напряжение на реле *KV* после установки переключателя *SA* в нулевое положение и размыкания контакта *2*. При исчезновении напряжения сети цепь катушки контактора *KM* в течение времени $t<0{,}5$ с остается замкнутой, так как реле *KV* удерживает свой контакт в замкнутом состоянии в течение времени 0,5 с (выдержка времени на отпускание равна 0,5 с). Если в течение 0,5 с напряжение сети восстанавливается, то контактор *KM* включается и происходит самозапуск двигателя. Если длительность перерыва в подаче напряжения более 0,5 с, то реле *KV* отключается и размыкает своим контактом цепь катушки контактора *KM*. Самозапуск двигателя при восстановлении напряжения не происходит.

Для ответственных двигателей время самозапуска может быть установлено до 10 с.

Номинальное напряжение для реле *KV* должно быть $U_{\text{ном,р}}=U_{\text{ном,с}}$.

Напряжение срабатывания для контактора переменного тока должно быть $U_{\text{ср}}\leqslant 0{,}85U_{\text{ном,с}}$, для контактора постоянного тока $U_{\text{ср}}\leqslant 0{,}65U_{\text{ном,с}}$.

Если требуется обеспечить самозапуск при значительных снижениях напряжения сети (до 50 %), применяются электромагнитные реле с высоким коэффициентом возврата. Напряжение отпускания таких реле

$$U_{\text{отп,р}} = (0{,}6 \div 0{,}7)\, U_{\text{ном,с}}.$$

При выборе реле следует проверить коммутационную способность контактов реле по току и напряжению катушки управляемого контактора.

Более подробные рекомендации по выбору реле приведены в [9.4].

Глава десятая

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В схемах защиты и автоматики часто требуется выдержка времени между срабатыванием двух или нескольких аппаратов. При автоматизации технологических процессов также может возникнуть необходимость в определенной временно́й последовательности операций. Для создания выдержки времени служат электрические аппараты, называемые реле времени.

Общими требованиями для реле времени являются:

а) стабильность выдержки времени при колебаниях напряжения, частоты питания, температуры окружающей среды и воздействии других факторов;

б) малые потребляемая мощность, масса и габариты.

Возврат реле в исходное положение происходит, как правило, при его обесточивании. Поэтому коэффициент возврата может быть очень низким.

В зависимости от назначения к реле времени предъявляются различные специфические требования. Для схем автоматического управления электроприводом при большой частоте включений требуются реле с высокой механической износостойкостью — до $(5 \div 10) \cdot 10^6$ срабатываний. Требуемые выдержки времени находятся в пределах 0,25—10 с. К этим реле не предъявляются требования относительно высокой стабильности выдержки времени. Разброс времени срабатывания может достигать 10 %. Реле должны работать в производственных условиях при наличии интенсивных механических воздействий.

Реле для защиты энергосистем должны иметь большую точность выдержки времени. Эти реле работают относительно редко, поэтому к ним не предъявляются особые требования по износостойкости. Износостойкость реле времени защиты порядка $(5 \div 10) \cdot 10^3$ срабатываний. Выдержки времени таких реле составляют 0,1—20 с.

Для автоматизации технологических процессов необходимы реле с большой выдержкой времени — от нескольких минут до нескольких часов. В этом случае, как правило, используются моторные реле времени. В настоящее время созданы также полупроводниковые реле с таким же большим диапазоном выдержки времени (см. § 12.4).

а) **Устройство реле и влияние различных факторов на его работу.** Принцип электромагнитного замедления рассмотрен в § 5.7. Конструкция реле с таким замедлением типа РЭВ-800 (рис. 10.1) содержит П-образный магнитопровод *1* и якорь *2* с немагнитной прокладкой *3*. Магнитопровод укрепляется на плите *4* с помощью литого алюминиевого цоколя *5*, на котором устанавливается контактная система *6*.

На магнитопроводе установлена намагничивающая обмотка *7* и короткозамкнутая обмотка в виде овальной гильзы *8*. Усилие возвратной пружины *9* изменяется с помощью регулировочной гайки *10*, которая фиксируется шплинтом.

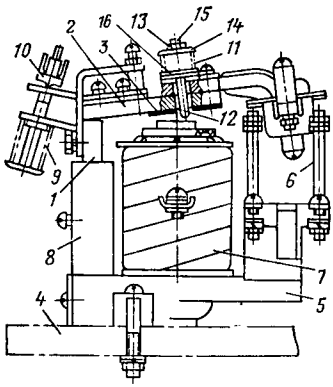


Рис. 10.1. Реле времени с электромагнитным замедлением

Для получения большой выдержки времени при отпускании необходима высокая магнитная проводимость рабочего и паразитного зазоров в замкнутом состоянии магнитной системы (см. § 5.7). С этой целью все соприкасающиеся детали магнитопровода и якоря тщательно шлифуются. Литой алюминиевый цоколь создает дополнительный короткозамкнутый виток, увеличивающий выдержку времени.

У реальных магнитных материалов после отключения намагничивающей обмотки поток спадает до $\Phi_{ост}$, который определяется свойствами материала магнитопровода, геометрическими размерами магнитной цепи и магнитной проводимостью рабочего зазора (см. § 5.8). Чем меньше коэрцитивная сила магнитного материала при заданных размерах магнитной цепи и магнитной проводимости рабочего зазора, тем ниже остаточная индукция, а следовательно, и остаточный поток. При этом возрастает наибольшая выдержка времени, которая может быть получена от реле. Применение стали с низким значением H_c позволяет увеличить выдержку времени.

Выдержка времени при отпускании для насыщенной

магнитной системы с короткозамкнутым витком или обмоткой может быть найдена с помощью формулы (5.90):

$$t = -\frac{w^2}{R}\int_{\Phi_0}^{\Phi_{отп}}\frac{d\Phi}{iw} = \frac{w^2}{R}\int_{\Phi_{отп}}^{\Phi_0}\frac{d\Phi}{iw} \text{ или } t = \frac{w^2}{R}\int_{\Phi_{отп}}^{\Phi_0}\frac{c\Phi}{i_1 w_1}, \quad (10.1)$$

где w — число витков короткозамкнутой обмотки; R — ее сопротивление; i — ток в короткозамкнутой обмотке; $\Phi_{отп}$ — значение магнитного потока, при котором происходит отпускание якоря; Φ_0 — установившееся значение магнитного потока в магнитопроводе при включенной намагничивающей обмотке; $i_1 w_1$ — МДС первичной обмотки.

Можно показать, что для получения большой выдерж-

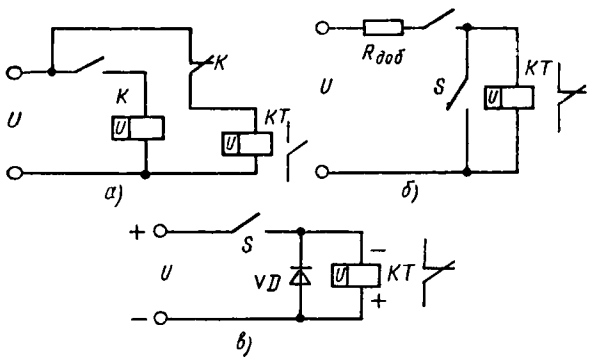


Рис. 10.2. Схемы включения реле с выдержкой времени

ки времени материал магнитопровода должен иметь высокую магнитную проницаемость на ненасыщенном участке кривой намагничивания.

б) **Схемы включения реле.** Время срабатывания реле с электромагнитным замедлением очень мало, так как постоянная времени мала из-за большого начального рабочего зазора, и трогание реле происходит при малом значении МДС обмотки. МДС трогания значительно меньше установившегося значения. Это время составляет 0,05—0,2 с при наличии короткозамкнутого витка и 0,02—0,05 с при его отсутствии. Таким образом, возможности электромагнитного замедления при срабатывании весьма ограничены. Поэтому используются специальные схемы включе-

ния электромагнитных реле (рис. 10.2). Если необходима большая выдержка времени при замыкании контактов, то целесообразна схема с промежуточным реле K (рис. 10.2, *а*). Обмотка реле времени KT все время подключена к напряжению через размыкающий контакт реле K. При подаче напряжения на обмотку K последнее размыкает свой контакт и обесточивает реле KT. Якорь KT отпадает, и его размыкающие контакты срабатывают с необходимой выдержкой времени, обусловленной временем срабатывания реле K и временем отпускания реле KT. В схеме рис. 10.2, *б* роль короткозамкнутого витка играет сама намагничивающая обмотка, которая питается через резистор $R_{доб}$. Напряжение, приложенное к обмотке, должно быть достаточным для насыщения магнитной цепи при притянутом якоре. При замыкании управляющего контакта S обмотка реле закорачивается и обеспечивается медленный спад потока в магнитной цепи. Отсутствие специальной короткозамкнутой обмотки позволяет все окно магнитопровода занять намагничивающей обмоткой и создать большой запас по МДС. При этом выдержка времени неизменна при снижении питающего напряжения на обмотке до $0{,}5U_{ном}$. Такая схема широко применяется в электроприводе. Обмотка реле включается параллельно ступени пускового реостата в цепи якоря. При закорачивании этой ступени обмотка реле замыкается, а его контакты с выдержкой времени включают контактор, шунтирующий следующую ступень пускового реостата (рис. 7.18).

Применение полупроводникового вентиля также позволяет использовать реле без короткозамкнутого витка (рис. 10.2, *в*). При включении обмотки ток через вентиль практически равен нулю. При отключении управляющего контакта S поток в магнитной цепи спадает и в обмотке наводится ЭДС с полярностью, указанной на рис. 10.2, *в*. При этом через вентиль протекает ток, определяемый этой ЭДС, активным сопротивлением обмотки и вентиля и индуктивностью обмотки.

Для того чтобы прямое сопротивление вентиля не приводило к уменьшению выдержки времени (растет активное сопротивление короткозамкнутой цепи), оно должно быть на один-два порядка ниже сопротивления обмотки.

При любых схемах обмотки реле питаются от источника либо постоянного, либо переменного тока с мостовой схемой выпрямления.

в) **Регулирование выдержки времени.** Время срабаты-

вания реле можно плавно регулировать с помощью возвратной пружины *9* (рис. 10.1). С увеличением сжатия этой пружины увеличивается электромагнитное усилие, необходимое для трогания якоря и определяемое потоком в магнитной цепи. При большем сжатии пружины поток трогания возрастает. Следовательно, возрастает время трогания.

При разомкнутой магнитной цепи постоянная времени обмотки мала и максимальная выдержка времени также незначительна (около 0,2 с). Выдержка времени значительно увеличивается, если поток трогания близок к установившемуся значению. Однако в этом случае реле работает на пологой части кривой $\Phi(t)$, что вызывает большие разбросы времени срабатывания.

Для получения выдержки времени 1 с и более, необходимо использовать отпускание якоря. Регулировка выдержки реле при отпускании может производиться плавно и ступенчато (грубо).

Плавное регулирование выдержки времени производится изменением усилия пружины *11* (рис. 10.1). Эта пружина верхним концом упирается в шайбу *14*, которая удерживается шпилькой *15*, ввернутой в якорь реле. Нижний конец пружины посредством специальной пластины *16* передает силу через два латунных штифта *12*, которые могут свободно перемещаться в отверстиях якоря. Оси латунных штифтов *12* смещены относительно оси пружины. В притянутом положении якоря *2* штифты *12* перемещаются вверх и пружина *11* дополнительно сжимается. Пружина *11* создает основную силу, отрывающую якорь от сердечника. Начальное сжатие пружины изменяется с помощью гайки *13*. С увеличением силы пружины *11* электромагнитное усилие, при котором происходит отрыв якоря, увеличивается и возрастает поток отпускания $\Phi_{отп}$. При этом время отпускания уменьшается (рис. 10.3). Чем меньше сила пружины, тем больше выдержка времени. Следует отметить, что при $\Phi_{отп}$, близком к $\Phi_{ост}$, якорь реле вообще может не отпадать от сердечника.

Возвратная пружина *9* регулируется так, чтобы обеспечить необходимое нажатие размыкающих контактов реле и четкий возврат якоря в положение, показанное на рис. 10.1 (после того как якорь оторвется от сердечника).

Грубое регулирование выдержки времени осуществляется изменением толщины немагнитной прокладки δ. Поскольку при притянутом якоре магнитная цепь насыщена,

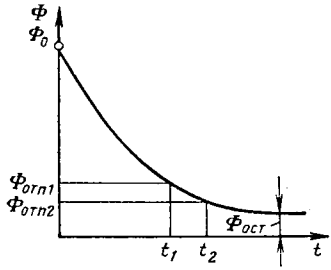


Рис. 10.3. Регулирование времени отпускания с помощью пружины

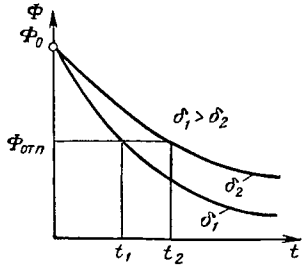


Рис. 10.4. Регулирование времени отпускания изменением немагнитного зазора

толщина немагнитной прокладки мало сказывается на установившемся потоке. С уменьшением толщины немагнитной прокладки ($\delta_2 < \delta_1$) растет индуктивность катушки при ненасыщенном магнитопроводе и уменьшается скорость спадания магнитного потока. В результате при неизменном усилии пружины *11* (рис. 10.1) выдержка времени увеличивается (рис. 10.4). Толщину немагнитной прокладки не рекомендуется брать менее 0,1 мм. В противном случае при повторно-кратковременном режиме работы якорь расклепывает немагнитную прокладку и толщина ее уменьшается, что ведет к изменению выдержки времени. При толщине прокладки $\delta \geqslant 0{,}1$ мм этим явлением можно пренебречь.

Следует отметить, что электромеханические реле времени достаточно просты по конструкции и обладают большой ударо-, вибро- и износостойкостью. Допустимое число включений достигает 600 в час. Они могут использоваться в схемах автоматики и электропривода как реле тока, напряжения и промежуточные. Коэффициент возврата их низок и составляет 0,1—0,3. Короткозамкнутые витки создают электромагнитное замедление как при притяжении, так и при отпускании якоря. Поэтому токовые реле с короткозамкнутым витком не реагируют на кратковременные перегрузки. При кратковременных перегрузках МДС обмотки пропорциональна этим перегрузкам.

Поток в магнитопроводе нарастает с постоянной времени $T_к$, определяемой параметрами короткозамкнутого витка $L_к/R_к$. Если перегрузка кратковременна и ее длительность $t_{пер} < t_{ср}$, то поток к моменту $t_{пер}$ не достигнет значения потока срабатывания и якорь останется неподвижным. Если $t_{пер} > t_{ср}$, то реле сработает. Таким образом, пред-

отвращается отключение нагрузки (двигателя) при больших, но кратковременных токовых перегрузках, не опасных для двигателя.

Промышленностью выпускаются многочисленные модификации реле с электромагнитным замедлением и выдержкой времени при отпускании 0,3—5 с. Современные реле имеют один или два унифицированных контактных узла. Каждый узел имеет один замыкающий и один размыкающий контакты с общей точкой. Постоянный ток включения контактов составляет 10 А при напряжении 110 В и 5 А при 220 В. Ток отключения для индуктивной нагрузки (катушки реле, контакторов) составляет 0,2, для активной 0,5 А.

10.3. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ С МЕХАНИЧЕСКИМ ЗАМЕДЛЕНИЕМ

а) **Реле с пневматическим замедлением и анкерным механизмом.** В таких реле электромагнит постоянного или переменного тока воздействует на контактную систему через замедляющее устройство в виде пневматического демпфера или часового (анкерного) механизма. Выдержка времени меняется при регулировке этого устройства. Преимуществом такого реле является возможность питания как переменным, так и постоянным током и независимость от напряжения и частоты питания, температуры.

Пневматическое реле РВП, применяемое в схемах электропривода металлорежущих станков и других механизмов, показано на рис. 10.5. При срабатывании электромагнита *1* колодка *2* под действием пружины опускается и воздействует на микропереключатель *4*. Колодка *2* связана с резиновой диафрагмой *5* пневматического замедлителя. Скорость движения колодки определяется сечением отверстия, через которое засасывается воздух в верхнюю полость замедлителя. Выдержка времени регулируется иглой *6*, меняющей сечение этого отверстия. Контактная система *7* срабатывает без выдержки времени.

Реле с пневматическим замедлением позволяет регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 с с точностью ±10 %. Контактная система микропереключателя допускает длительный ток 3 А, ток отключения 0,21 А при переменном напряжении 380 В [9.5].

В замедлителях в виде анкерного механизма его пружина заводится под воздействием электромагнита. Контак-

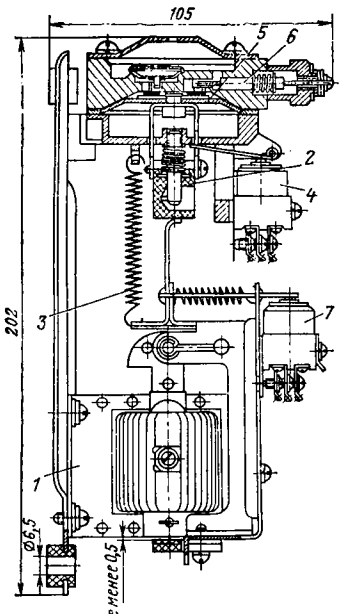


Рис. 10.5. Реле времени с пневматическим замедлением

ты реле приходят в движение лишь после того, как связанный с ними анкерный механизм отсчитает определенное время уставки.

Выдержка времени у этих реле регулируется в пределах от 7 до 17 с с точностью ± 10 % уставки. В реле имеются и нерегулируемые контакты, которые связаны с якорем электромагнита и используются в цепях, не требующих выдержки времени. Реле надежно работают при напряжении питания до $0{,}85U_{ном}$. Так как износостойкость анкерного механизма составляет всего 15 000 срабатываний, такие реле не применяются при частых включениях.

б) **Моторные реле.** Для создания выдержки времени 20—30 мин используются так называемые моторные реле времени, в состав которых входит электродвигатель с заданной частотой вращения. Промышленностью выпускаются большие серии этих реле на выдержки времени от 1 с до 26 мин и с различным исполнением контактов. На рис. 10.6 показано устройство моторного реле. Для пуска реле подается напряжение на электромагнит *1* и двигатель *2*. С помощью рычага *12* электромагнит без выдержки времени включает муфту *3*, *4* и замыкает выходной контакт *5*. Через муфту и зубчатую передачу *6* двигатель начинает вращать диски *7* с кулачками *8* и *9*, воздействующими на промежуточные кулачки *10* и *11* и выходные контакты *16* и *13*. При соприкосновении кулачков *8* и *10* последний поворачивается против часовой стрелки и дает возможность контактной пластине *14* опуститься вниз под действием силы упругости. При этом контакт *16* размыкается. При соприкосновении кулачков *9* и *11* последний поворачивается и освобождает пластину *15*, что вызывает замыкание контакта *13*. Выдержка времени работы контактов

16 и *13* регулируется путем изменения начального положения дисков *7*. При снятии напряжения с реле диски *7* поворачиваются в начальное положение с помощью спиральной возвратной пружины *17*.

Точность работы реле ±5 с. Реле позволяет устанавливать различную выдержку времени в пяти независимых цепях. Выходные контакты реле допускают длительный

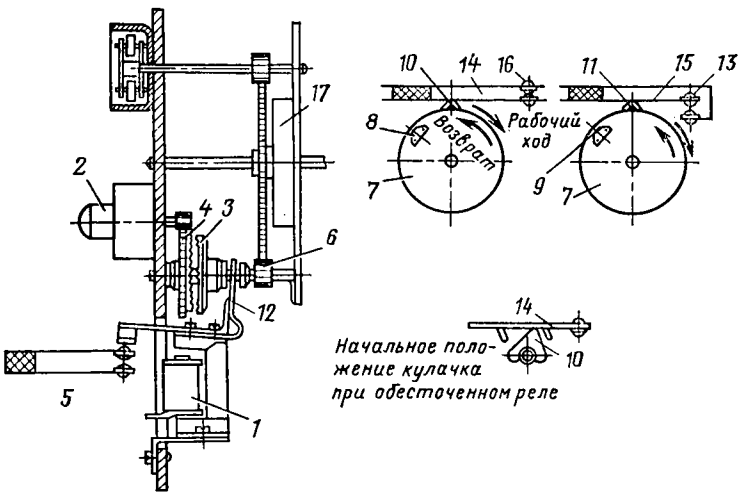


Рис. 10.6. Моторное реле времени

ток 10 А и при переменном токе могут отключать нагрузку мощностью 800 В·А при напряжении 220 В и 100 Вт при том же напряжении и индуктивной нагрузке постоянного тока. Допустимые колебания напряжения составляют $(0{,}9 \div 1{,}12)\,U_{ном}$, износостойкость не менее 1000 циклов. Время возврата не более 1 с.

Глава одиннадцатая

ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ

11.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Наименее надежным узлом электромагнитных реле является контактная система. Электрическая дуга или искра, образующиеся при размыкании и замыкании контактов,

приводят к их быстрому разрушению. Этому также способствуют окислительные процессы и покрытие контактных поверхностей слоем пыли, влаги, грязи. Существенным недостатком электромагнитных реле является и наличие трущихся механических деталей, износ которых также сказывается на их работоспособности. Попытки разместить контакты и электромагнитный механизм в герметизированном объеме с инертным газом не приводят к положитель-

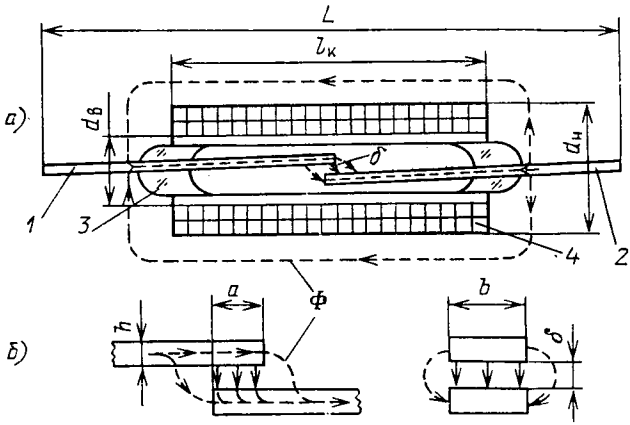


Рис. 11.1. Простейшее герконовое реле с симметричным замыкающим контактом

ным результатам из-за больших технологических и конструктивных трудностей, а также из-за того, что контакты при этом не защищаются от воздействия продуктов износа и старения изоляционных материалов. Другим недостатком электромагнитных реле является их инерционность, обусловленная значительной массой подвижных деталей. Для получения необходимого быстродействия приходится применять специальные схемы форсировки, что приводит к снижению надежности и росту потребляемой мощности.

Перечисленные недостатки электромагнитных реле привели к созданию реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами (герконами).

Простейшее герконовое реле с замыкающим контактом изображено на рис. 11.1, *а*. Контактные сердечники (*КС*) *1* и *2* изготавливаются из ферромагнитного материала с вы-

сокой магнитной проницаемостью (пермаллоя) и вваривают-ся в стеклянный герметичный баллон *3*. Баллон заполнен инертным газом — чистым азотом или азотом с небольшой (около 3 %) добавкой водорода. Давление газа внутри баллона составляет $(0{,}4—0{,}6)\cdot 10^5$ Па. Инертная среда предотвращает окисление КС. Баллон устанавливается в обмотке управления *4*. При подаче тока в обмотку возникает магнитный поток Ф, который проходит по КС

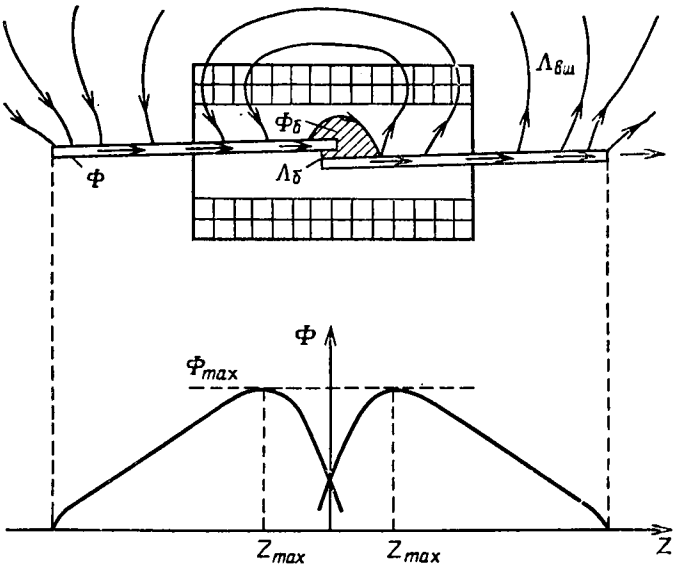


Рис. 11.2. Упрощенная картина магнитного поля геркона, управляемого обмоткой с током

1 и *2* через рабочий зазор δ между ними и замыкается по воздуху вокруг обмотки *4*. Упрощенная картина магнитного поля показана на рис. 11.2. Поток Ф при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу $P_э$, которая, преодолевая упругость КС, соединяет их между собой. Для улучшения контактирования поверхности касания покрываются тонким слоем (2—50 мкм) золота, родия, палладия, рения, серебра и др.

При отключении обмотки магнитный поток и электромагнитная сила спадают и под действием сил упругости КС размыкаются. Таким образом, в герконовых реле от-

сутствуют детали, подверженные трению (места крепления якоря в электромагнитных реле), а КС одновременно выполняют функции магнитопровода, токопровода и пружины.

В связи с тем что контакты в герконе управляются магнитным полем, герконы называют магнитоуправляемыми контактами.

На основе герконов могут быть созданы также реле с размыкающими и переключающими контактами. В герконе с переключающим контактом (рис. 11.3, *а*) неподвижные КС *1*, *3* и подвижный *2* размещены в баллоне *4*. При появлении сильного магнитного поля КС *2* притягивается

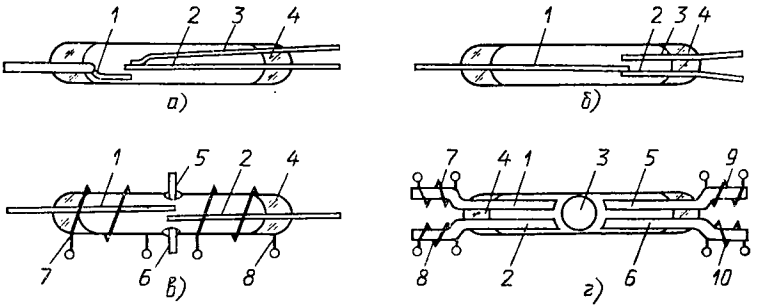


Рис. 11.3. Переключающие герконы

к КС *1* и размыкается с КС *3*. Один из КС переключающего геркона (например, *2*) может быть выполнен из немагнитного материала (рис. 11.3, *б*). Герконовое реле (рис. 11.3, *в*) имеет два подвижных КС *1*, *2*, два неподвижных КС *5*, *6* и две обмотки управления *7*, *8*. При согласном включении обмоток замыкаются КС *1* и *2*. При встречном включении обмоток КС *1* замыкается с КС *5*, а КС *2* с КС *6*. При отсутствии тока в обмотках все КС разомкнуты. Герконовое реле (рис. 11.3, *г*) имеет переключающий контакт *3* сферической формы. При согласном включении обмоток *7* и *8* контакт *3* притягивается к КС *1* и КС *2* и замыкает их. После отключения обмоток *7* и *8* и при согласном включении обмоток *9* и *10* контакт *3* замыкает КС *5* и КС *6*.

Так как КС герконов выполняют функции возвратной пружины, им придаются определенные упругие свойства. Упругость КС обусловливает возможность их вибрации («дребезга») после удара, который сопутствует срабатыванию. Длительность такой вибрации достигает 0,25 мс

при общем времени срабатывания 0,5—1 мс. Одним из способов устранения влияния вибраций является использование жидкометаллических контактов. В переключающем герконе (рис. 11.4, *а*) внутри подвижного КС *1* имеется капиллярный канал, по которому из нижней части баллона *4* поднимается ртуть *5*. Ртуть смачивает поверхности касания КС *1* с КС *2* или КС *3*. В момент удара контактов при срабатывании возникает их вибрация. Из-за ртутной пленки на контактной поверхности КС *1* вибрация не приводит к разрыву цепи. В конструкции на рис. 11.4, *б* между КС *2*, КС *3* и ртутью *5* находится ферромагнитная изоляционная жидкость *6*. При возникновении магнитного поля ферромагнитная жидкость *6* перемещается вниз, в положение, при котором поток будет наибольшим. Ртуть вытесняется вверх и замыкает КС *2* и КС *3*. Следует отметить, что жидкометаллический контакт позволяет уменьшить переходное сопротивление и значительно увеличить коммутируемый ток. Наличие ртути удлиняет процесс разрыва контактов, что увеличивает время отключения реле.

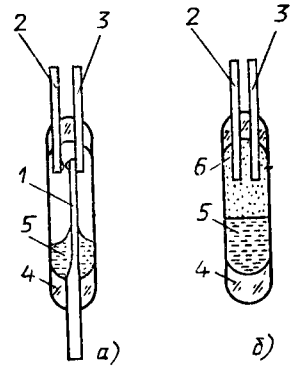


Рис. 11.4. Ртутные герконы

Управление герконом можно осуществлять и с помощью постоянного магнита. Если постоянный магнит установлен вблизи геркона, его магнитный поток замыкается через КС, которые в результате этого находятся в замкнутом состоянии. Использование постоянного магнита совместно с управляющей катушкой позволяет создать герконовое реле с размыкающим контактом.

11.2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕРКОНОВОГО РЕЛЕ С ОБМОТКОЙ

а) **Электромагнитная сила в герконе.** На упрощенной схеме замещения (рис. 11.5) магнитной цепи геркона, показанного на рис. 11.1, обозначены: Λ_δ — полная магнитная проводимость рабочего зазора с учетом потоков выпучивания; $\Lambda_{вш}$ — проводимость пути магнитного потока по воздуху вне КС; $\Lambda_{кс}$ — суммарная магнитная проводи-

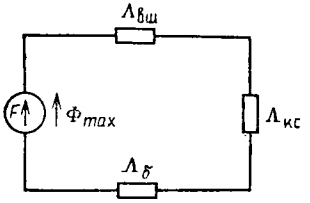


Рис. 11.5. Упрощенная схема замещения магнитной цепи геркона

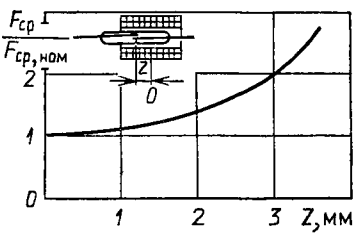


Рис. 11.6. Влияние смещения Z центра обмотки относительно центра перекрытия КС на МДС срабатывания геркона $F_{ср}$

мость обоих КС; Φ — магнитный поток, созданный обмоткой; F — МДС обмотки.

Изменение магнитного потока вдоль КС показано на рис. 11.2. Вблизи рабочего зазора образуются заметные магнитные потоки выпучивания. В результате магнитный поток Φ в сечении КС уменьшается по мере приближения к зазору δ. Наибольшего значения Φ_{max} магнитный поток достигает при координате $Z=Z_{max}$. Этот поток определяется уравнением

$$\Phi_{max} = F/\left[\left(1/\Lambda_{\delta}\right) + \left(1/\Lambda_{вш}\right) + \left(1/\Lambda_{кс}\right)\right].$$

Для ненасыщенных КС проводимость $\Lambda_{кс}$ велика и $1/\Lambda_{кс}=0$.

При расчете электромагнитной силы, воздействующей на КС, можно воспользоваться формулой Максвелла либо энергетическим методом (§ 5.6). Эта сила выражается через конструктивные параметры уравнением [11.1]

$$P_{э} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{\mu_0\, ab\,(1 + K\delta/a)} = \frac{F^2}{2\mu_0\, b\,(a + K\delta)}\left(\frac{\Lambda_{\delta}\,\Lambda_{вш}}{\Lambda_{\delta} + \Lambda_{вш}}\right)^2,$$

где Φ_{δ} — магнитный поток в рабочем зазоре; a и b — размеры рабочего зазора (рис. 11.1, *б*); $K = 6{,}66 + 44{,}4h/b$ — коэффициент неравномерности поля в рабочем зазоре.

Иногда с целью регулировки МДС срабатывания центр рабочего зазора геркона и центр обмотки *0* смещается на расстояние Z (рис. 11.6).

Внешняя проводимость

$$\Lambda_{вш} = \frac{2 - \dfrac{Z}{L}\left(1 + \dfrac{Z}{L}\right)}{3\pi}\,\mu_0\,\frac{3\,(L + p_c) - l_к}{2 - \dfrac{p_c\, l_к}{\pi(Q + l_к d_{вт})}},$$

где L — полная длина геркона; p_c — периметр поперечного сечения КС; $d_{вт}$ — внутренний диаметр обмотки управления; $l_к$ — длина обмотки; $\pi(Q+l_к d_{вт})/l_к$ — средняя длина витка обмотки; Q — площадь поперечного сечения обмотки.

Проводимость Λ_δ рекомендуется определять с учетом выпучивания по формуле [11.1]

$$\Lambda_\delta \simeq \mu_0 \frac{ab}{\delta} \sqrt{1 + K\delta/a}.$$

Зависимость $P_э = f(\delta)$ имеет вид гиперболы (рис. 11.7). Противодействующая сила создается упругостью КС и определяется формулой

$$P_{пр} = c(\delta_н - \delta),$$

где c — эквивалентная жесткость КС, представляющая собой жесткость контактной системы, в которой один КС неподвижен, а второй перемещается, $c = c_1 c_2/(c_1+c_2)$; c_1, c_2 — жесткость первого и второго КС; $\delta_н$ — начальный зазор между концами КС; δ — текущее значение зазора. Для симметричного геркона $c_1 = c_2$ и $c = 0{,}5c_1$.

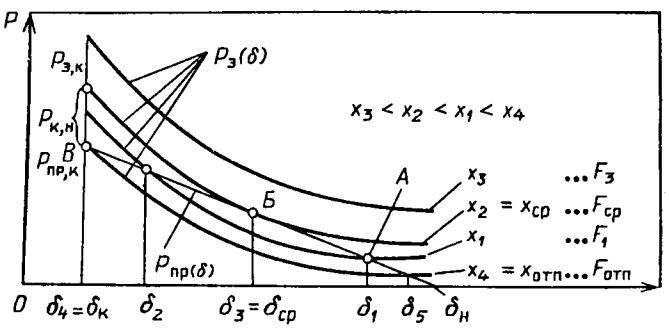


Рис. 11.7. Тяговые и противодействующая характеристики геркона: $F_{ср}$, $F_{отп}$ — МДС срабатывания и отпускания, $F_{отп} < F_1 < F_{ср}$; $F_3 > F_{ср}$

На рис. 11.7 представлены электромагнитные тяговые $P_э(\delta)$ и противодействующая $P_{пр}(\delta)$ характеристики геркона. При $F = F_1$ равновесное состояние $P_э(\delta_1) = P_{пр}(\delta_1)$ определяется точкой A. При дальнейшем увеличении МДС точки равновесия поднимаются. При МДС, равной МДС срабатывания $F_{ср}$, и зазоре $\delta = \delta_3$ (точка $Б$) происходит срабатывание и замыкание КС реле. Зазор δ_3 называется зазором срыва $\delta_{ср}$. КС переходят в конечное положение,

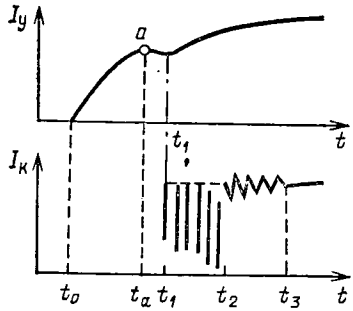


Рис. 11.8. Изменение тока управления $I_у$ и тока в нагрузке $I_к$ при срабатывании геркона

определяемое зазором $\delta_4=\delta_к$, который определяется толщиной контактного покрытия и неровностями контактной поверхности. Разность между конечной электромагнитной силой $P_{э,к}$ и конечной силой пружины $P_{пр,к}$ $P_{э,к}—P_{пр,к}=$ $=P_{к,н}$ определяет контактное нажатие.

Для надежного срабатывания необходимо, чтобы $F=$ $=(1{,}5\div 2)F_{ср}$. Минимальная МДС срабатывания реле имеет место, когда зазор между КС геркона расположен посередине обмотки. Зависимость $F_{ср}/F_{ср,ном}$ от положения обмотки управления относительно рабочего зазора геркона показана на рис. 11.6. Здесь $F_{ср,ном}$ — номинальная МДС срабатывания при $Z=0$. Следует отметить, что на чувствительность реле влияет также длина обмотки $l_к$. Уменьшение в определенных пределах значения $l_к$ при неизменности сечения приводит к увеличению магнитного потока в рабочем зазоре геркона и уменьшению МДС срабатывания.

Изменение тока управления $I_у$ обмотки и коммутируемого тока $I_к$ показаны на рис. 11.8. Обмотка управления включается в момент времени t_0. Начало быстрого движения КС (после прохождения зазора $\delta=\delta_3=\delta_{ср}$ на рис. 11.7) обусловливает уменьшение скорости нарастания тока $I_у$ (точка a на рис. 11.8). В момент времени t_1 контакты касаются и вибрируют до момента времени t_2. В интервале от t_2 до t_3 контакты не размыкаются, но ток меняется из-за изменения контактного нажатия и вызванного этим изменения переходного сопротивления (шум контактов).

В отличие от электромагнитных реле обычного типа, у которых контактное нажатие зависит только от параметров контактной пружины, контактное нажатие герконовых реле зависит от МДС обмотки и увеличивается с ее ростом.

Для размыкания контактов герконового реле необходимо, чтобы тяговая характеристика опустилась ниже точки B (см. рис. 11.7). Коэффициент возврата герконового реле равен $k_в = F_{отп}/F_{ср}$, где $F_{отп}$ — МДС отпускания.

Если увеличивается толщина немагнитного контактного покрытия $\delta_к$, то МДС срабатывания $F_{ср}$ не изменяется, так как начальный немагнитный зазор $\delta_н$ остается без изменения, а МДС $F_{отп}$ увеличивается, поскольку возрастает $\delta_к$, при этом коэффициент возврата $k_в$ увеличивается. По сравнению с обычными электромагнитными реле он значительно выше и иногда доходит до 0,9. Из-за технологических погрешностей коэффициент возврата, как и другие характеристики герконовых реле, имеет довольно большой разброс и у одного и того же типа реле может колебаться от 0,3 до 0,9.

б) **Время срабатывания герконового реле.** После подключения обмотки реле к источнику напряжения ток $I_у$ начинает нарастать в соответствии с рис. 11.8. Движение КС геркона начинается практически сразу же после включения обмотки и длится до тех пор, пока зазор не достигнет значения зазора срыва $\delta_з = \delta_{ср}$ (см. рис. 11.7). После достижения $\delta_{ср}$ КС быстро замыкаются. Скорость перемещения подвижного КС на участке $\delta_{ср} — \delta_к$ намного выше, чем на участке $\delta_н — \delta_{ср}$. Изменение воздушного зазора δ и связанное с этим изменение магнитной проводимости приводит к тому, что индуктивность обмотки изменяется на протяжении всего времени срабатывания и особенно резко — после прохождения точки срыва, т. е. после $\delta = \delta_{ср}$. В результате увеличения индуктивности скорость нарастания тока и его значение уменьшаются (момент времени от $t_а$ до t_1 на рис. 11.8). Аналитический расчет времени срабатывания герконового реле очень сложен. В основном он заключается в расчете времени изменения зазора от $\delta_н$ до $\delta_{ср}$. Для герконового реле, у которого длина КС одинакова, время с момента включения обмотки до первого касания контактов можно определить с помощью уравнения [11.2]

$$t_1 = (\delta_н — \delta_к)\sqrt{\frac{m}{A}},$$

где m — эквивалентная масса подвижной части КС; A — постоянная, определяемая размерами, материалом и жесткостью КС.

Введение понятия эквивалентной массы вызвано раз-

личной траекторией движения для различных точек подвижного КС. По опытным данным, это значение составляет 25 % перемещающейся массы подвижного КС.

11.3. КОНСТРУКЦИЯ ГЕРКОНОВЫХ РЕЛЕ

Конструкция герконового реле, показанная на рис. 11.9, *а*, имеет разомкнутую магнитную цепь. По этой причине большая доля МДС катушки расходуется на проведение магнитного потока по воздуху. Кроме того, такая конструкция подвержена воздействию внешних магнитных

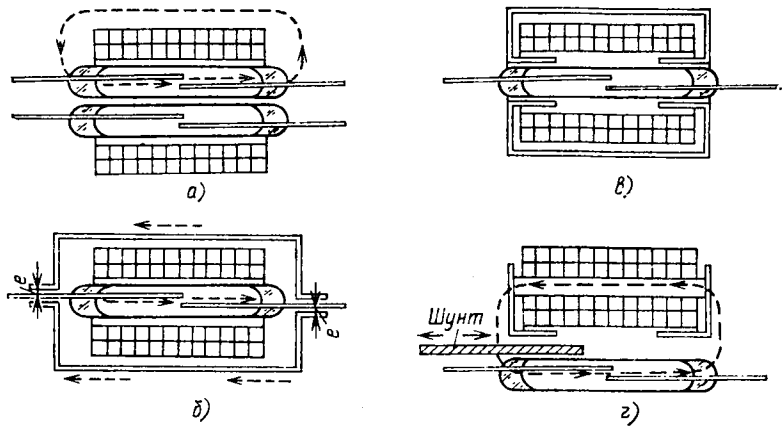


Рис. 11.9. Конструктивные выполнения герконовых реле

полей, создаваемых расположенными рядом электротехническими устройствами. Конструкция по рис. 11.9, *а* может и сама явиться источником электромагнитных помех для этих устройств. Для устранения этого недостатка магнитная система геркона заключается в кожух (экран) из магнитомягкого материала (рис. 11.9, *б*, *в*). При этом увеличивается магнитная проводимость $\Lambda_{вш}$ и снижается МДС срабатывания. С целью увеличения эффективности экрана паразитный зазор δ (рис. 11.9, *б*) стараются уменьшить либо увеличить его площадь (рис. 11.9, *в*). Регулирование значений МДС срабатывания и отпускания в условиях серийного производства может производиться за счет либо изменения зазора δ (рис. 11.9, *б*), либо изменения положения магнитного шунта (рис. 11.9, *г*), либо

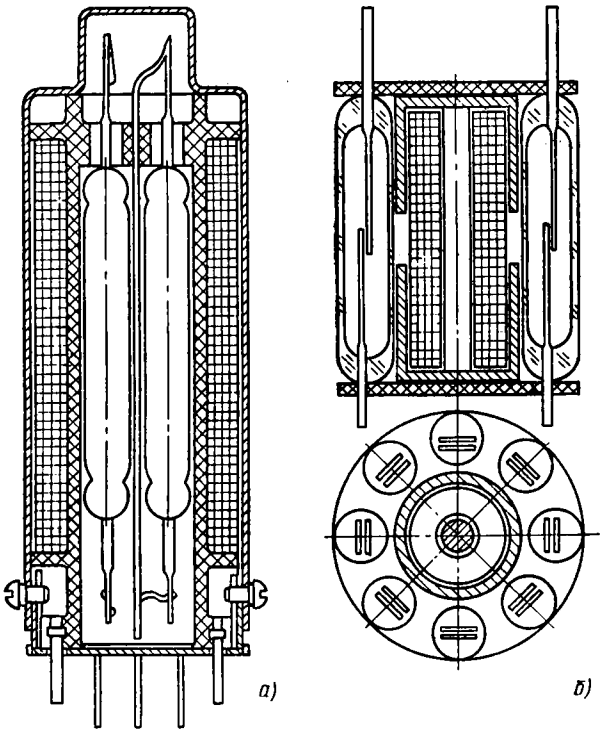


Рис. 11.10. Многоцепевые герконовые реле:

а — герконы расположены внутри катушки; *б* — герконы находятся вне катушки

осевого смещения геркона в обмотке (рис. 11.6). Герконы могут быть установлены как внутри (рис. 11.10, *а*), так и снаружи управляющей обмотки (рис. 11.10, *б*).

Условия работы герконов в многоцепевых герконовых реле характеризуются следующими особенностями. Во-первых, даже герконы одного типа и из одной партии имеют технологический разброс по МДС срабатывания и МДС отпускания. Во-вторых, из-за неравномерности магнитного поля первым срабатывает геркон, находящийся в области с большей напряженностью поля. В-третьих, срабатывание одного геркона приводит к магнитному шунтированию других, в результате МДС срабатывания второго геркона после срабатывания первого увеличивается. В этом отношении конструкция с внешним расположением герконов

(рис. 11.10, *б*) предпочтительнее, чем с внутренним, так как обеспечивает меньшее взаимное влияние соседних герконов. Число герконов в одном реле может достигать 12 и более. По перечисленным причинам разные контакты многоцепевых герконовых реле замыкаются и размыкаются неодновременно, что является их недостатком по сравнению с электромагнитными реле обычного типа.

Герконовые реле разнообразны по конструкции и назначению. На рис. 11.11 показан принцип действия герконового реле тока. В реле контроля большого тока используется компоновка, показанная на рис. 11.11. Контролируемый ток *I* проходит по шине *1*. Магнитное поле этого тока замыкается вокруг шины и по КС геркона *2*. Ток срабатывания геркона может регулироваться за счет изменения угла α и расстояния x между шиной и герконом. Наименьший ток срабатывания имеет место при $\alpha=90°$. При $\alpha=0$ геркон не срабатывает при любом значении тока, так как магнитный поток в направлении продольной оси КС равен нулю.

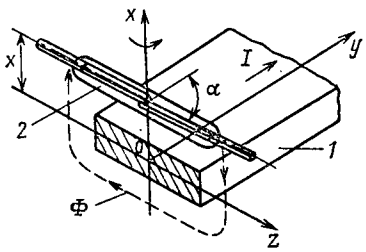


Рис. 11.11. Реле тока на герконе

Если кроме основного поля управления (МДС $F_у$) создать дополнительное поляризующее магнитное поле за счет специальной обмотки (МДС $F_п$) или постоянного магнита (рис. 11.12), то герконовое реле становится поляризованным. Если $F_п \geqslant F_{у,ср}$, то под действием МДС $F_п$ контакты геркона замкнутся. Для размыкания контактов МДС обмотки управления $F_у$ должна быть меньше $F_п$ и иметь обратный знак. Если продолжать увеличивать $F_у$, то при определенном ее значении произойдет повторное замыкание контактов геркона. В общем случае можно написать

$$F_{ср} = F_у + F_п,$$

где МДС поляризации $F_п$ может быть положительной (совпадать по знаку с $F_у$) или отрицательной. В последнем случае

$$F_{ср} = F_у - F_п.$$

Для отпускания геркона имеем $F_{отп}=F_у+F_п=\text{const}$.

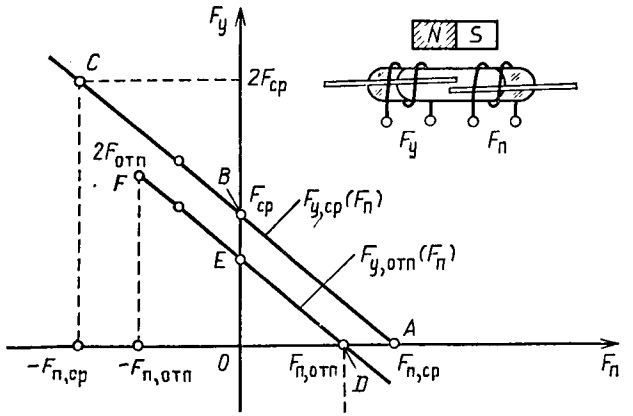


Рис. 11.12. Характеристики поляризованного герконового реле

Влияние поляризующего поля на МДС срабатывания $F_{ср}$ и отпускания $F_{отп}$ показано в табл. 11.1.

Таблица 11.1

$F_п$	$+F_{п,ср}$	0	$-F_{п,ср}$	$+F_{п,отп}$	0	$-F_{п,отп}$
$F_{у,ср}$	0	$F_{ср}$	$2F_{ср}$	—	—	—
$F_{у,отп}$	—	—	—	0	$F_{отп}$	$2F_{отп}$
Точки на характеристиках	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*

Зависимость $F_{у,ср}$ и $F_{у,отп}$ от $F_п$ (рис. 11.12) представлена прямыми *ABC* и *DEF*.

11.4. УПРАВЛЕНИЕ ГЕРКОНОМ С ПОМОЩЬЮ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

Управлять состоянием геркона можно с помощью не только магнитного поля, создаваемого катушкой управления, но и поля постоянного магнита. Такой способ широко используется в современных слаботочных аппаратах управления (тумблеры, переключатели, кнопки, командо-

аппараты) и контрольно-измерительной аппаратуре (сигнализаторы положения, конечные выключатели, датчики) Состояние геркона изменяется при приближении или удалении от него постоянного магнита. При приближении постоянного магнита на расстояние x_1 (см. рис. 11.6) его магнитный поток начинает замыкаться по КС. Под воздействием усилия, созданного этим потоком, КС сблизятся и зазор между ними уменьшится от $\delta_н$ до δ_1 (точка A).

При дальнейшем уменьшении x усилие, создаваемое постоянным магнитом, увеличится и характеристика $P_э$ поднимется. При $x_2 = x_{ср}$ КС замыкаются. Для обеспечения запаса по усилию координата x_3 берется меньше x_2. Минимальное контактное нажатие при $x_2 = x_{ср}$ равно $P_{к,н}$.

Отпускание геркона происходит при увеличении координаты x до значения $x_4 = x_{отп}$.

Постоянный магнит может подходить к геркону так, что его ось намагничивания будет параллельна оси МК. В этом случае геркон реагирует на тангенциальную составляющую индукции $B_τ$ поля постоянного магнита (рис. 11.13, *а*). Изменение $B_τ$ при перемещении магнита показано на том же рисунке. Срабатывание геркона наступает в точках $B_τ = B_{ср}$. Таким образом, при движении магнита в направлении, указанном стрелкой, возможно трехкратное

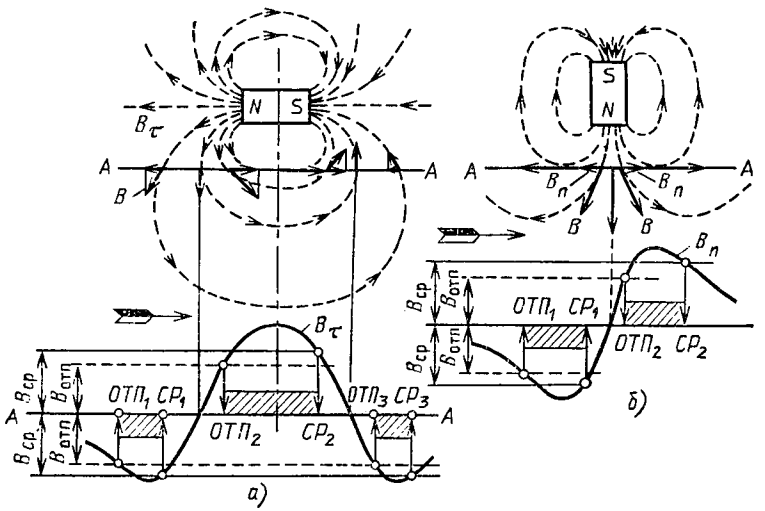


Рис. 11.13. Влияние тангенциальной (*а*) и нормальной (*б*) составляющих магнитного поля магнита на работу геркона

срабатывание (точки $СР_1$—$СР_3$) и отпускание (точки $ОТП_1$—$ОТП_3$). Первое срабатывание происходит в точке $СР_3$.

Если ось намагничивания магнита перпендикулярна оси МК (рис. 11.13, *б*), то при движении магнита в указанном стрелкой направлении происходит двукратное срабатывание геркона, который реагирует на нормальную составляющую B_n напряженности поля.

Для устройств, управляемых постоянным магнитом, основными параметрами являются:

а) координата срабатывания $y_{ср}$, определяющая расстояние между магнитом и герконом в момент срабатывания;

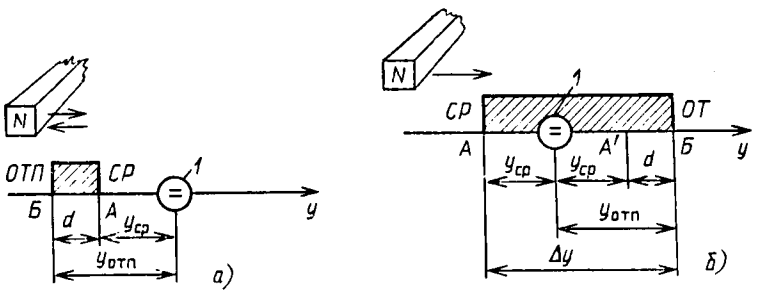


Рис. 11.14. Дифференциал хода d и зона включенного состояния Δy геркона

б) координата отпускания $y_{отп}$, определяющая расстояние между магнитом и герконом при отпускании;

в) дифференциал хода d, представляющий собой разность координат: $d = y_{отп} - y_{ср}$;

г) зона включенного состояния Δy, составляющая $\Delta y = y_{отп} + y_{ср} = 2y_{ср} + d$.

Перечисленные выше характеристики поясняются рис. 11.14. В точке $А$ геркон *1* срабатывает, а в точке $Б$ — отпускает при реверсивном перемещении управляющего элемента — постоянного магнита N (рис. 11.14, *а*) и при отсутствии реверса (рис. 11.4, *б*). Величины d и Δy в большинстве случаев должны быть минимальны, так как большая величина d увеличивает зону нечувствительности контрольно-измерительной аппаратуры. При большом количестве герконов они могут быть установлены по окружности (рис. 11.15, *а*). Постоянный магнит *1* укреплен на вращающемся рычаге и поочередно замыкает герконы *3*, *2*, *4*. Для умень-

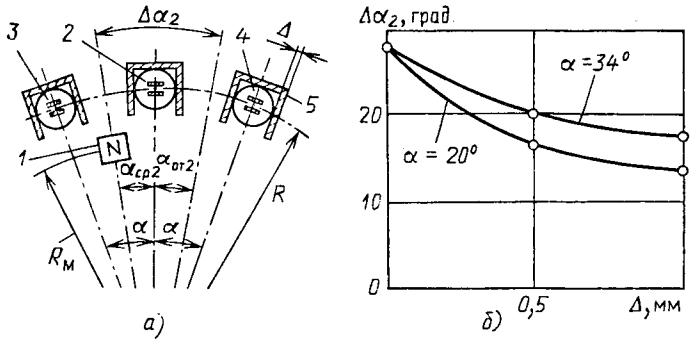


Рис. 11.15. Работа герконов в многоконтактных переключателях:

а — расположение герконов и постоянного магнита; *б* — зависимость зоны включенного состояния (угла $\Delta\alpha_2$) от толщины экрана Δ

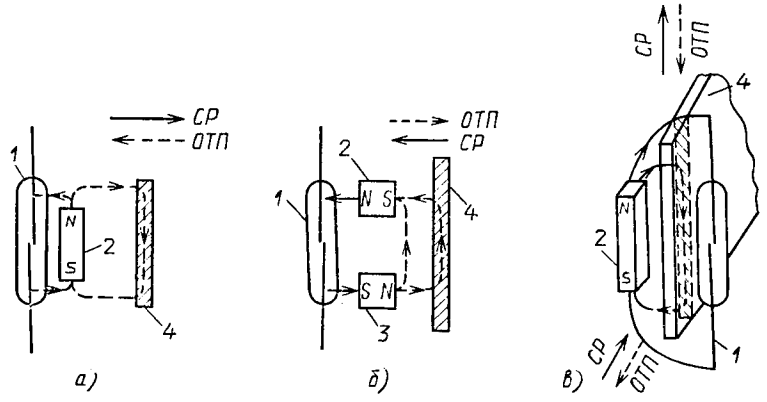


Рис. 11.16. Управление герконом с помощью ферромагнитного экрана:

а — геркон *1* срабатывает при удалении экрана *4* от постоянного магнита *2*; *б* — геркон *1* срабатывает при приближении к постоянным магнитам *2* и *3* экрана *4*; *в* — геркон *1* срабатывает при удалении экрана *4* из зазора между герконом и постоянным магнитом *2*

шения зоны включенного состояния $\Delta\alpha_2$ герконы помещены в магнитные экраны *5*. Влияние толщины экрана на работу геркона показано на рис. 11.15, *б*.

Следует отметить, что при наличии постоянного магнита управление герконом может производиться за счет перемещения ферромагнитного экрана (рис. 11.16).

11.5. ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ С ПАМЯТЬЮ

Простейшее герконовое реле с магнитной памятью показано на рис. 11.17, *а*. Два элемента магнитной памяти (ЭМП) *1* и *1′* примыкают к КС геркона *3*. ЭМП выполняются из так называемых ременентных материалов. Эти материалы характеризуются прямоугольностью петли гистерезиса, достаточно высокой остаточной индукцией и большой магнитной энергией. В отличие от магнитотвердых сплавов, используемых для изготовления постоянных магнитов, ременентные материалы обладают очень малым вре-

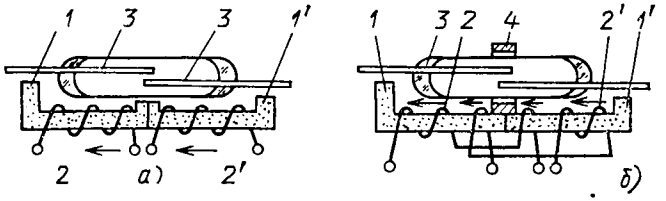


Рис. 11.17. Герконовые реле с магнитной памятью

менем перемагничивания, находящимся в пределах 10—50 мкс. Остаточный магнитный поток, создаваемый ЭМП, может быть использован для удержания герконов в замкнутом состоянии после обесточивания обмоток управления. Реле с магнитной памятью часто называют ферридами. При появлении управляющего импульса и согласном включении обмоток *2* и *2′* создаваемый ими магнитный поток проходит через КС и оба ЭМП, которые намагничиваются. После прохождения импульса КС притягиваются за счет потока остаточной индукции ЭМП. Для отключения реле в обмотку *2* подается импульс тока той же полярности и амплитуды, а в обмотку *2′* — той же амплитуды и обратной полярности. За счет разности МДС обмоток происходит размагничивание ЭМП и уменьшение магнитного потока в зазоре между КС, и они размыкаются. Для надежного управления длительность импульса тока срабатывания берется равной 100—300 мкс.

Для уменьшения минимально необходимого импульса МДС отпускания устанавливается магнитомягкий шунт *4* в зоне рабочего зазора геркона (рис. 11.17, *б*). При подаче разнополярных импульсов в обмотки *2* и *2′* магнитный поток замыкается через КС, магнитный шунт *4* и ЭМП, ми-

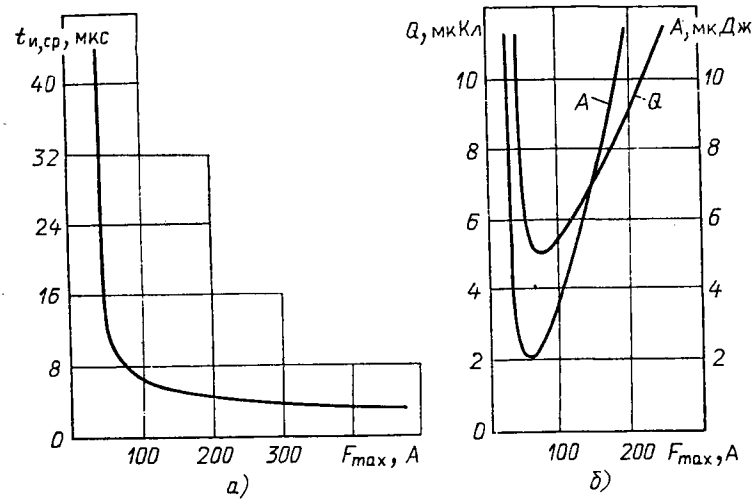


Рис. 11.18. Зависимости длительности $t_{и.ср}$ импульса МДС срабатывания (*а*), количества электричества Q и потребляемой энергии A (*б*) от амплитуды МДС F_{max}

нуя рабочий зазор геркона. При подаче импульса на срабатывание реле происходит намагничивание ЭМП, сближение КС. После их соударения начинается вибрация контактов, которая длится 0,5—2,5 мс. Общее время срабатывания реле с памятью 1—3 мс. У гезаконов (рис. 11.20) оно меньше (1—2 мс).

Амплитуда импульса МДС срабатывания F_{max} зависит от его длительности (рис. 11.18, *а*). Чем больше амплитуда F_{max}, тем меньше потребная длительность импульса $t_{и.ср}$. На рис. 11.18, *б* представлена зависимость энергии A и количества электричества Q от амплитуды МДС. Здесь $Q = \int_0^t idt$ — количество электричества, необходимое для срабатывания реле при заданной амплитуде МДС; $A = \int uidt$ — энергия, затраченная источником питания при срабатывании реле.

Для каждого реле с памятью существует оптимальное значение амплитуды импульса $F_{отп}$, при котором энергия A и количество электричества Q имеют минимальное значение. Эти величины особенно важны при питании феррида

от маломощного источника (конденсатора или аккумулятора).

Длительность импульса отпускания $t_{и,отп}$ зависит от амплитуды $F_{и,ср}$ и длительности $t_{и,ср}$ импульса срабатывания. Чем больше $F_{и,ср}$ и $t_{и,ср}$, тем больше остаточная индукция. Для отпускания реле требуются большие значения $F_{и,отп}$ и длительности импульса $t_{и,отп}$.

Герконовое реле с магнитной памятью и переключающими контактами (рис. 11.19) имеет два ЭМП *1* и 1_1 и две обмотки управления 2_1 и 2_2. При согласном включении обмоток и подаче на них импульсов одинаковой полярности

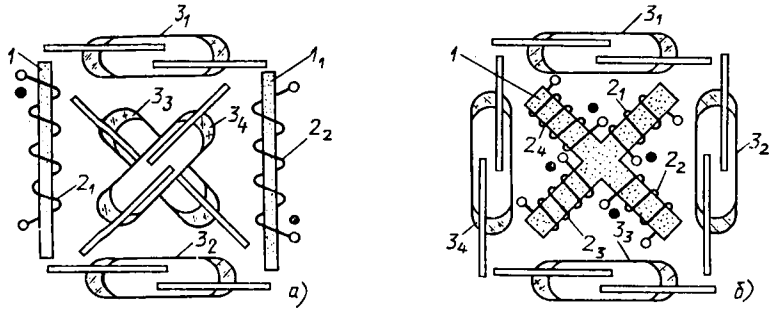


Рис. 11.19. Многоцепевое герконовое реле с магнитной памятью

магнитный поток, созданный ЭМП *1* и 1_1, проходит через КС герконов 3_1 и 3_2, и они замыкаются. По КС герконов 3_3 и 3_4 магнитный поток не проходит, так как в месте их расположения магнитные потоки от ЭМП *1* и *1′* встречны. После прохождения управляющего импульса герконы 3_1 и 3_2 остаются замкнутыми, а 3_3 и 3_4 — разомкнутыми. При подаче на обмотку 2_1 импульса того же знака, а на обмотку 2_2 такого же импульса обратного знака происходит изменение направления намагничивания ЭМП 1_1. При этом магнитные потоки проходят через рабочие зазоры герконов 3_3, 3_4 и не проходят через рабочие зазоры герконов 3_1 и 3_2, которые размыкаются благодаря упругим свойствам КС.

В герконовом реле, показанном на рис. 11.19, *б*, возможны 16 комбинаций замкнутых и разомкнутых герконов в зависимости от того, какие обмотки включены. Например, если все обмотки включены так, что создаваемые ими потоки направлены от центра к периферии, то все герконы будут разомкнуты.

Реле с магнитной памятью могут быть построены на базе специальных герконов, в которых ЭМП частично или полностью расположены внутри баллона. Такие герконы иногда называются гезаконами (герметичными запоминающими контактами). Возможные исполнения гезаконов показаны на рис. 11.20. Для исполнения по рис. 11.20, *а* контактные сердечники *1* и *2* изготавливаются из реманентных материалов 35КХ12, 35КХ15, 40КНБ (сплавы кобальта и хрома) и выполняют функции ЭМП. Соединительные пластины *6* соединяют выводы геркона с КС *1* и *2*. В испол-

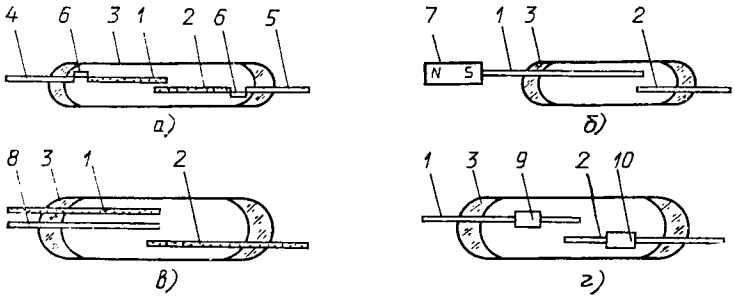


Рис. 11.20. Конструкция гезаконов:

1, 2, 8 — контактные сердечники; *3* — баллон; *4, 5* — выводы; *6* — соединительная пластина; *7* — постоянный магнит; *9, 10* — ЭМП

нении по рис. 11.20, *б* из реманентного материала выполнен только КС *2*. На баллоны гезаконов устанавливаются две обмотки управления. При согласном включении обмоток КС намагничиваются и замыкаются. Для размыкания необходимо при последующем включении изменить полярность импульса в одной из обмоток, что приводит к размагничиванию КС.

В случае рис. 11.20, *в* управление происходит от одного источника разнополярных импульсов. Через вывод *1* замыкается поток поляризующего постоянного магнита *7*. При подаче управляющего импульса, создающего магнитное поле, согласное с магнитным полем постоянного магнита, эти поля складываются и КС замыкаются. При подаче встречного импульса КС размагничиваются и размыкаются.

Переключающий гезакон (рис. 11.20, *в*) имеет две обмотки управления. При согласном включении обмоток КС

1 и *2* намагничиваются согласно и КС *8* притягивается к КС *2*. При изменении полярности импульса в одной из обмоток меняется направление намагниченности одного из КС и КС *8* притягивается к КС *1*.

В гезаконе на рис. 11.20, *г* ЭМП выполнены в виде трубок *9*, *10*, надеваемых на КС *1* и *2*. При согласном включении обмоток управления трубки ЭМП *9* и *10* намагничиваются согласно и КС замыкаются. Для отключения геркона в одной из обмоток надо поменять полярность импульса.

11.6. ГЕРКОНЫ С БОЛЬШОЙ КОММУТАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

С целью увеличения коммутируемого тока и коммутируемой мощности в конструкцию герконов можно ввести дугогасительные контакты (рис. 11.21, *а*). В стеклянном корпусе *6* укреплены подвижный КС *1* и неподвижный КС *2*. Пластина *5*, выполняющая функцию дугогасительного контакта, упирается в КС *1*, благодаря чему создается ее упругая деформация. При включении вначале замыкаются дугогасительные контакты *3* и *4*, причем контактное на-

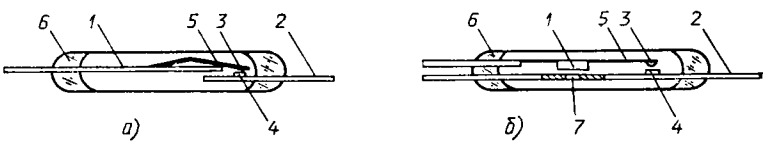


Рис. 11.21. Силовые герконы

жатие на них появляется сразу благодаря предварительной упругой деформации пластины *5*. При этом снижается вибрация контактов *3* и *4*. Затем замыкаются главные контакты *1* и *2*. При отключении вначале размыкаются главные контакты *1* и *2*, а затем дугогасительные *3* и *4*. Дугогасительные контакты выполняются из эрозионно-стойкого материала (вольфрама и др.).

В другом варианте конструкции силового геркона (рис. 11.21, *б*) функции главных контактов выполняются КС *1* и *2*. Отверстие *7* в КС *2* приводит к быстрому насыщению материала. При этом магнитный поток из КС *2* переходит в перемычку *1* и КС *1* притягивается к КС *2*. Сначала замыкаются дугогасительные контакты *3*, *4*, затем главные *1* и *2*.

В настоящее время разработаны и внедрены так называемые герсиконы (герметичные силовые контакты) [11.3]. На рис. 11.22 показан контактор на основе герсикона типа КМГ-12. Токоведущая цепь герсикона состоит из токоподводов *1* и *2*, гибкой связи *3*, подвижного контакта *4* и регулируемого неподвижного контакта *5*. Электромагнитный узел состоит из сердечника *6*, обмотки *7*, полюсов *8*, *9*, набора ферромагнитных пластин *10* и упора *11*. Пластины *10* крепятся к полюсу *8* с помощью винта *12*. Коммутирующая часть аппарата находится внутри герметичного керамического корпуса *13*, заполненного инертным газом. Нажатие контактов регулируется в процессе сборки путем изменения положения неподвижного контакта *5*. После регулировки контакт *5* пропаивается.

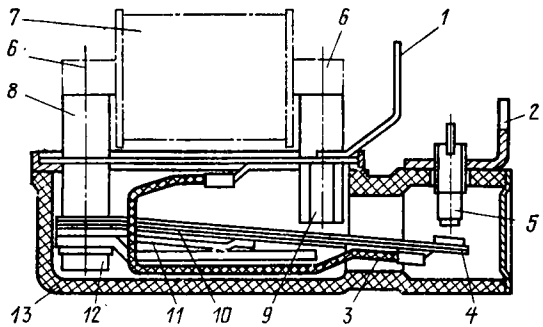


Рис. 11.22. Герсиконовый контактор

Герсиконы типа КМГ-12 выпускаются на номинальный ток 6,3, включаемый ток до 180, отключаемый ток 63 А, максимальная мощность двигателя, который может запускаться в режиме АС-3 при напряжении 380 В, равна 3 кВт при частоте включения до 1200 в час. Механическая и коммутационная износостойкость при мощности двигателя 1,8 кВт составляет 10^7 циклов. При постоянном токе 1 А и напряжении 220 В коммутационная износостойкость достигает $3 \cdot 10^6$ циклов. Время срабатывания не более 20 мс. Как показали исследования, максимальный ток герсиконов может быть доведен до 100 А при напряжении 380 В. Высокая надежность и простота конструкции делают герсиконы весьма перспективными для применения в коммутационных электрических аппаратах.

11.7. РАСЧЕТ ОБМОТОК ГЕРКОНОВЫХ РЕЛЕ

Важнейшим параметром геркона, который приводится в его паспорте, является МДС срабатывания $F_{ср}$, по значению которой можно определить параметры обмотки. Расчетная МДС обмотки

$$F_р = k_F k_n F_{ср},$$

где $k_F = 1{,}2 \div 2$ — коэффициент запаса, учитывающий технологические разброс параметров геркона, допустимые колебания питающего напряжения и изменение сопротивления обмотки при нагреве; k_n — коэффициент, учитывающий взаимное влияние совместно установленных герконов. По опытным данным, $k_n = \sqrt[3]{n}$, где n — число герконов в реле.

Рассмотрим случай, когда обмотка питается от источника напряжения. Диаметр неизолированного провода $d_{пр}$ обмотки можно найти, воспользовавшись (5.39),

$$\pi d_{пр}^2/4 = q = F\rho_\tau l_{ср}/U,$$

где ρ_τ — удельное сопротивление материала провода обмотки в горячем состоянии; $l_{ср}$ — средняя длина витка обмотки; U — напряжение источника.

Удельное сопротивление ρ_τ находим по формуле

$$\rho_\tau = \rho_0 [1 + \alpha_R (\tau_{доп} + \theta_{окр} + \theta_0)].$$

Для медного провода $\rho_0 = 0{,}0175 \cdot 10^6$ Ом·м при температуре $\theta_0 = 20$ °С; $\theta_{окр}$ — температура окружающей среды, °С; $\tau_{доп} = \theta_{доп} - \theta_{окр}$ — допустимое превышение температуры обмотки, °С; $\alpha_R = 0{,}004$ 1/°С. Средняя длина витка

$$l_{ср} = \pi D_{ср} = \pi (d_в + d_п + 2h_к)/2 = \pi (d_в + h_к),$$

где $d_в = d_б + 2(\Delta + \Delta_{кар})$ — внутренний диаметр обмотки; $d_б$ — диаметр баллона геркона; Δ — зазор между баллоном и каркасом; $\Delta_{кар}$ — толщина каркаса катушки управления; $h_к$ — радиальная толщина обмотки.

Согласно рекомендациям [11.3] для получения минимальной МДС срабатывания площадь сечения обмотки Q и ее радиальная толщина $h_к$ выбираются по соотношениям

$$Q = 3d(L + \pi d)/8; \quad h_к = Q/l_к \simeq d_в; \quad l_к = 4d(L + \pi d)/d_в,$$

где d — диаметр стержня КС; L — длина геркона.

Ориентировочно длина обмотки $l_к = (0{,}25 \div 0{,}5)L$. Найденный диаметр $d_{пр}$ округляется до стандартной величины.

Число витков обмотки

$$w = h_к l_к k_{з,м}/q.$$

Коэффициент заполнения обмотки медью $k_{з,м}$ берется по табличным данным для принятого $d_{пр}$ [11.3].

Расчет превышения температуры τ обмоток для установившегося режима ведется по формуле

$$\tau = P/(k_т S_{охл}),$$

где $k_т$ — коэффициент теплоотдачи (10 Вт·м$^{-2}$·°С$^{-1}$); $S_{охл}$ — поверхность охлаждения обмотки; P — мощность, выделяемая в обмотке,

$$P = I^2 R = U^2/R = U^2 q/(\rho_т l_{ср} w) = U^2 q/[\rho_т \pi (d_в + h_к) w].$$

Поверхность охлаждения $S_{охл} = \pi (d_в + 2h_к) l_к$...

Диаметр провода $d_{пр}$ проверяем из условий нагрева в установившемся режиме

$$I^2 R = 4I^2 \rho_т l_{ср} w/(\pi d_{пр}^2) = k_т S_{охл} \tau.$$

После выбора $d_{пр}$ [11.1] проводим поверочный расчет F и τ с учетом коэффициента заполнения $k_{з,м}$. Если обмотка работает в режиме кратковременного включения, то допустимое время включения

$$t_{вкл} = T \ln \tau_р/(\tau_р - \theta_{доп} + \theta_{окр}),$$

где $\tau_р$ — допустимое превышение температуры; T — постоянная времени нагрева обмотки.

Согласно (§ 2.5) имеем

$$T = cG/(k_т S_{охл}) = \frac{c(\pi d_{пр}^2/4)[(2d_в + 2h_к)/2]\gamma}{\pi k_т (d_в + 2h_к) l_к},$$

где c — удельная теплоемкость материала провода [для меди $c = 390$ Вт·с/(кг·°С)]; G — масса провода, кг; γ — плотность материала провода, кг/м^3 (для меди $\gamma = 8900$ кг/м^3).

Нагрев геркона при повторно-кратковременном режиме рассчитывается по методике § 2.5.

11.8. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ГЕРКОНОВ. ГЕРКОНЫ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

1. Благодаря полной герметизации герконы обладают следующими преимуществами: возможность работы в условиях повышенной влажности, запыленности и т. п. при низком переходном сопротивлении в замкнутом положении

(0,01—0,001 Ом) и малом падении напряжения на контактах;

2) простота конструкции, малые масса и габариты, что позволяет автоматизировать их производство и снизить стоимость изготовления;

3) высокое быстродействие (время срабатывания и отпускания 1—3 мс), что позволяет использовать герконы при частоте коммутаций до 1000 в секунду;

4) отсутствие трущихся деталей и сложных кинематических пар обеспечивает надежную работу герконов в течение 10^6—10^8 циклов;

5) высокая электрическая прочность междуконтактного промежутка;

6) гальваническая развязка цепей управления и коммутируемых цепей;

7) возможность управления как электромагнитным полем, так и полем постоянного магнита, что расширяет функциональные области применения герконов;

8) надежность работы в широком диапазоне температур (от —60 до +120 °С);

9) удобство согласования с современными изделиями микроэлектроники.

Возможность работы от кратковременных импульсов (но не менее 10 мкс) и малая энергия, потребляемая при таком управлении, позволяют широко использовать герконы как выходные (усилительные) элементы в серии полупроводниковых элементов «Логика И».

Герконы имеют следующие недостатки:

1) сравнительно низкая чувствительность по МДС управления;

2) восприимчивость к внешним магнитным полям, что требует специальных мер по защите от их воздействия;

3) хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам и вибрациям, что требует специальных мер по амортизации места установки герконов;

4) значительное время вибрации контактов, которое может составлять до половины времени срабатывания;

5) малая мощность коммутируемых цепей;

6) возможность самопроизвольного размыкания контактов при больших токах;

7) недопустимое размыкание и замыкание контактов при питании обмотки током низкой частоты;

8) значительный технологический разброс параметров.

Преимущества и недостатки герконов предопределили

Таблица 11.2. Основные технические данные герконов

Параметр	КЭМ-1	КЭМ-6	МК-27	МК-17	КЭМ-2	МК-16	МК-10	МКВ-1	КЭМ-3	КЭМ-5	КРМ-6
	замыкающие								переключающие		замыкающий
Общая длина, мм	79	64	45	45	41	30	40	48	54	65	67,5
Длина баллона, мм	50	37	28	20	20	16	10	23	18	44	43
Диаметр баллона, мм	5,4	4,2	3,6	3,1	3	2,6	2,3	4,4	4	8	8
Максимальная коммутируемая мощность, Вт	30	12	12	7,5	9	0,3	0,6	6,0	7,5	200	80
Максимальный коммутируемый ток, А	1,0	0,15	0,35	0,25	0,25	0,01	0,03	0,2	0,25	2	3
Максимальное коммутируемое напряжение, В	250	220	127	80	180	30	35	36	180	100	20
Максимальное время срабатывания, мс	3	2	2,3	1,5	1,0	1,0	0,8	1,0	1,5	10	4
Максимальное время отпускания, мс	0,8	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	—	2,0	8	3
Максимальная МДС срабатывания, А	110	50	80	80	65	35	40	120	100	300	—
Минимальная МДС отпускания, А	25	—	15	—	10	—	—	6	15	62	—
Максимальный коэффициент возврата	0,85	0,9	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	—	0,9	—	—
Минимальный коэффициент возврата	0,45	0,3	0,35	0,5	0,35	0,3	0,5	—	0,35	0,2	—

их область применения. Они широко используются в схемах автоматики и защиты как логические элементы, преобразователи неэлектрических величин в электрические, как электромеханические усилители сигналов между полупроводниковыми устройствами и силовыми электрическими аппаратами.

В табл. 11.2 приведены технические данные герконов отечественного производства. В таблице приведены максимально допустимые значения коммутируемого тока I_{max}, напряжения U_{max} и мощности P_{max}. При уменьшении коммутируемого тока значение допустимого напряжения увеличивается ($U=P_{max}/I$), но не должно превышать значения U_{max}, определяемого электрической прочностью рабочего зазора. При уменьшении напряжения коммутируемый ток увеличивается, но не должен быть больше значения I_{max}.

Параметры коммутируемых цепей приведены для чисто активной нагрузки. При смешанной нагрузке RL коммутационная способность геркона ухудшается и должна оговариваться заводом-изготовителем для данного значения постоянной времени нагрузки $T=L/R$. Если заданы параметры только для активной нагрузки, а цепь имеет смешанный характер, то для облегчения работы контакты реле следует шунтировать цепочкой R, C, параметры которой выбираются по рис. 3.10.

Глава двенадцатая

БЕСКОНТАКТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

12.1. РЕЛЕЙНЫЙ РЕЖИМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

а) **Общие сведения.** В цепях постоянного и выпрямленного тока транзистор можно рассматривать как управляемое активное сопротивление. Пределы изменения этого сопротивления очень широки, что позволяет использовать транзисторы для создания разнообразных бесконтактных электрических аппаратов управления и защиты. Транзисторы широко применяются для создания бесконтактных реле и логических элементов.

Транзисторы обладают высоким уровнем вибро- и уда-

ростойкости и надежности. Их долговечность достигает многих десятков тысяч часов.

Основные недостатки транзисторов заключаются в отсутствии полного разрыва цепи в состоянии отсечки, гальванической связи цепи управления (базы) и нагрузки, в зависимости параметров от температуры.

б) **Однокаскадный полупроводниковый усилитель на транзисторе с проводимостью** *p-n-p*. Транзистор имеет три электрода: эмиттер *Э*, коллектор *К* и базу *Б*. Схема усилителя с общим эмиттером изображена на рис. 4.35, *а*. Указанные на рисунке направления токов, напряжений и ЭДС приняты за положительные. Ток эмиттера равен сумме токов коллектора и базы $i_Э = i_К + i_Б$. В зависимости от тока базы изменяется сопротивление между эмиттером и коллектором. В результате изменяется и ток через нагрузку $R_н$. Характеристика усилителя представлена на рис. 4.35, *б*. При отрицательном токе управления $-I_{у0}$ через нагрузку протекает минимальный ток $I_{К0}$, причем $|I_{К0}| = |I_{у0}|$. Этот режим называется режимом отсечки и обозначается буквой О.

Если ток управления $i_у$ уменьшить до нуля, а затем увеличивать в положительной области, то ток в нагрузке растет. При токе в базе $I_{Бн}$ наступает режим насыщения транзистора (обозначается буквой Н). В этом режиме сопротивление между эмиттером и коллектором мало и ток в нагрузке определяется ее сопротивлением $R_н$. Ток управления, который необходим для перевода из состояния О в состояние Н, называется током переключения $I_{у,п}$.

На рис. 4.35, *в* изображена зависимость тока в нагрузке от напряжения управления $u_у$. Вследствие нелинейности сопротивления перехода эмиттер—база зависимость тока в нагрузке $i_н$ от управляющего напряжения $u_у$ имеет нелинейный характер. Отрицательное значение этого напряжения $-U_{у0}$ называется напряжением отсечки, а положительное значение $U_{у,н}$ — напряжением насыщения. В транзисторе *p-n-p* увеличение коллекторного тока происходит при увеличении отрицательного потенциала базы транзистора относительно эмиттера. Для перевода транзистора из закрытого состояния в открытое необходимо к $-U_{у0}$ добавить положительное напряжение переключения $U_{у,п}$.

Важнейшей характеристикой транзистора является зависимость между током коллектора и током базы. Отношение приращения тока в коллекторной цепи к приращению тока в цепи базы называется коэффициентом усиления по

гоку. Для схемы с общим эмиттером этот коэффициент $\beta = \Delta I_К / \Delta I_Б$. Чем больше β, тем круче зависимость $I_К(I_Б)$.

Согласно [6.1] запирающее напряжение $U_{у0} = 0{,}05 \div 0{,}12$ В для транзисторов с $\beta = 10 \div 100$. Так как ток и напряжение отсечки сильно увеличиваются с ростом температуры, для надежного запирания напряжение $U_{у0}$ берется равным 0,1—0,5 В.

Надежная работа транзистора, стабильность его характеристик в значительной степени зависят от его температуры. Эта температура определяется температурой окружающей среды и мощностью, выделяющейся в транзисторе при прохождении по нему тока. Мощность, выделяющаяся в транзисторе, должна быть меньше мощности, рассеиваемой транзистором, которая указывается в его паспорте. Мощность, выделяющаяся в транзисторе в режиме О

$$P_0 \approx E_К I_{К0}.$$

Так как ток $I_{К0}$ мал, мощность, выделяющаяся в транзисторе, также мала. В этом режиме к коллекторному переходу приложено практически все напряжение источника $E_К$. Это напряжение должно быть меньше предельно допустимого значения напряжения, приводимого в паспорте транзистора, $U_{Кдоп}$. Обычно $E_К = U_{Кдоп}/(1{,}5 \div 2)$.

При увеличении тока управления $i_у$ растет ток нагрузки $I_К$ и увеличивается мощность, выделяемая в транзисторе, равная

$$P = U_{ЭК} I_К,$$

где $U_{ЭК}$ — напряжение между эмиттером и коллектором транзистора.

Мощность $P_{рас}$, которая может рассеиваться транзистором, постоянна. Поэтому допустимые значения тока $I_К$ и напряжения $U_{ЭК}$ связаны гиперболической зависимостью. Вначале с ростом $I_К$ мощность, выделяемая в транзисторе, растет, а затем падает из-за резкого уменьшения $U_{ЭК}$. Наибольшая мощность P_{max} выделяется в транзисторе, когда сопротивление нагрузки $R_н$ равно внутреннему сопротивлению транзистора $R_{ЭК}$. Эта мощность должна быть меньше мощности, которую может рассеять транзистор при допустимой температуре:

$$P_{max} \leqslant P_{рас}.$$

Для получения режима Н необходимо увеличить ток

управления до значения $I_{у,п}$. Это значение связано с током насыщения $I_{Кн}$ через коэффициент усиления по току:

$$I_{у,п} = \frac{I_{Кн}}{\beta} = \frac{E_К - U_{ЭКн}}{\beta R_н} \approx \frac{E_К}{\beta R_н}, \qquad (12.1$$

где $U_{ЭКн}$ — падение напряжения между эмиттером и коллектором в режиме Н. Учитывая, что $I_{у0}$ мал, можно считать

$$I_{Бн} \approx E_К/(\beta R_н).$$

Для уменьшения $U_{ЭКн}$, а следовательно, и выделяемой в транзисторе мощности рекомендуемый ток базы при насыщении берется больше $I_{Бн}$:

$$I_{Брек} = k_н I_{Бн}, \; k_н = 1{,}5 \div 2.$$

Следует отметить, что при увеличении $k_н$ повышается стабильность работы схемы при колебаниях температуры, напряжения питания, а также при изменениях и разбросе параметров входящих в схему элементов. Однако при этом ухудшается быстродействие, так как требуется более длительное время для вывода транзистора из состояния насыщения. Существует оптимальное значение $k_н$.

Мощность, выделяемая в транзисторе в режиме Н,

$$P_{нас} = U_{ЭК} I_{Кн} < P_{рас}$$

и существенно больше мощности P_0.

В полупроводниковых реле и логических элементах транзистор находится либо в режиме О, либо в режиме Н. Переход из одного режима в другой происходит так быстро, что определяющим по нагреву является только режим Н, когда падение напряжения на транзисторе мало. Такой режим транзистора называется ключевым. Режим Н эквивалентен замкнутому состоянию контактов реле, режим О — разомкнутому.

Допустимая мощность нагрузки для данного транзистора в ключевом режиме в десятки раз больше допустимой нагрузки для того же транзистора в режиме линейного непрерывного управления. Поэтому ключевой режим позволяет лучше использовать транзистор по мощности.

На активно-индуктивной нагрузке при переходе из режима Н в режим О наводится большая ЭДС самоиндукции $E_н = -Ldi/dt$, обусловленная высокой скоростью спада тока. В результате между коллектором и эмиттером действует сумма напряжения источника питания $E_К$ и ЭДС Ldi/dt.

Электродвижущая сила Ldi/dt может быть настолько большой, что произойдет пробой транзистора. Для снятия таких перенапряжений [6.1] нагрузка шунтируется диодом *VD* (рис. 4.36, *а*).

Следует отметить, что наличие такого диода снижает скорость спада потока в индуктивной нагрузке и, следовательно, уменьшает быстродействие при отключении.

в) **Двухкаскадный транзисторный усилитель.** Для получения релейного режима число усилительных каскадов должно быть не менее двух. Некоторые варианты схем двухкаскадного усилителя приведены на рис. 12.1.

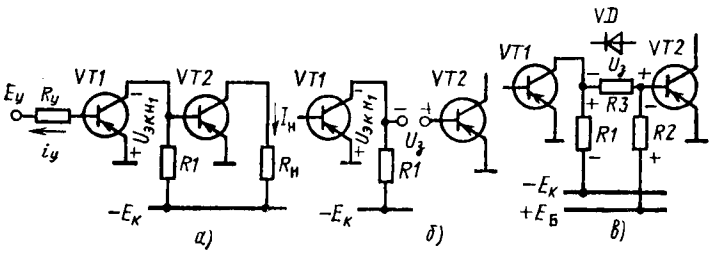


Рис. 12.1. Двухкаскадный транзисторный усилитель

Если транзистор *VT1* находится в состоянии О, то к базе транзистора *VT2* приложено практически полное напряжение источника питания $E_К$. Под действием этого напряжения транзистор *VT2* полностью насыщен (находится в состоянии Н) и через нагрузку течет максимальный ток $I_н \approx \approx E_К / R_н$ (рис. 12.1, *а*).

Если увеличивать ток в базе транзистора *VT1*, то увеличивается его коллекторный ток, протекающий через резистор *R1*. Из-за падения напряжения на этом резисторе отрицательный потенциал на базе транзистора *VT2* будет уменьшаться, что ведет к уменьшению тока в нагрузке $R_н$. В момент, когда транзистор *VT1* будет насыщен, к базе транзистора *VT2* будет приложен потенциал, равный $-U_{эКн}$ транзистора *VT1*. Для отсечки транзистора *VT2* необходимо подать на его базу положительный потенциал, чего нельзя получить в схеме рис. 12.1, *а*.

Для полной отсечки транзистора *VT2* необходимо ввести запирающее напряжение $U_э$ (рис. 12.1, *б*), которое создает необходимый отрицательный ток базы $I_{у02}$ (рис. 4.35, *б*).

Потенциал базы транзистора *VT2*

$$U_{Б2} = -U_{ЭК\,н1} + U_з. \qquad (12.2)$$

Для запирания *VT2* необходимо условие

$$-U_{ЭК\,н1} + U_з \geqslant U_{у0}.$$

По мере увеличения положительного сигнала $U_у$ напряжение $U_{ЭКн1}$ по модулю уменьшается. При определенном значении соблюдается условие закрытия второго транзистора и ток в нагрузке становится равным нулю.

Схема рис. 12.1, *б* обладает тем недостатком, что транзистор *VT2* требует отдельного запирающего источника. Более удобна схема рис. 12.1, *в*. Здесь необходимое запирающее напряжение получается от общего для обоих транзисторов напряжения $E_Б$. Ток от источника $+E_Б$, протекая по резисторам *R2*, *R3* и открытый транзистор *VT1*, создает на них падения напряжения. Напряжение на *R3* является запирающим для транзистора *VT2*.

Если транзистор *VT1* находится в режиме О, ток, протекающий через базу транзистора *VT2* в схеме рис. 12.1, *в*, уменьшается по сравнению со схемой рис. 12.1, *а* из-за наличия резистора *R3*, что ведет к уменьшению коэффициента усиления каскада в отношении $R_1/(R_1+R_3)$.

Этот недостаток можно устранить, заменив резистор *R3* стабилитроном *VD*. Использование в качестве резистора связи стабилитрона *VD*, включенного в проводящем направлении, улучшает показатели усилителя, так как сопротивление стабилитрона нелинейно. При открытии *VT2* ток междукаскадной связи возрастает, а сопротивление стабилитрона существенно уменьшается.

г) **Релейный режим двухкаскадного усилителя.** Характерной особенностью усилителя схемы рис. 12.1, *в* является то, что приращение потенциала базы транзистора *VT1* вызывает одинаковое по знаку и усиленное приращение потенциала на коллекторе *VT2*. Это позволяет получить положительную обратную связь путем соединения этих точек резистором обратной связи $R_{о,с}$ (рис. 12.2). Путь тока обратной связи показан штриховой линией. Ток базы транзистора *VT1*

$$i_{Б1} = -i_у + i_{о,с}.$$

Положительный ток управления $i_у$ закрывает транзистор *VT1*, а ток $i_{о,с}$, вытекающий из базы этого транзистора,

наоборот, стремится открыть этот транзистор. При отрицательном токе управления ток базы

$$i_{Б1} = |i_у| + i_{о.с}.$$

Зависимость коллекторного тока транзистора *VT1* и тока нагрузки $i_{К1}$ от тока управления показана на рис. 12.3, *а*. При отсутствии обратной связи ($R_{о.с}=\infty$) усилитель находится в режиме линейного управления (рис. 12.3, *а*). Переход транзистора *VT2* из состояния H_2 в состояние O_2 происходит при изменении тока управления от $i_{у1}$ до $i_{у2}$. Соответствующие токи коллектора *VT1* равны $I_{К1н2}$ и $I_{К102}$. В зоне *AA* транзистор *VT1* находится в режиме плавного

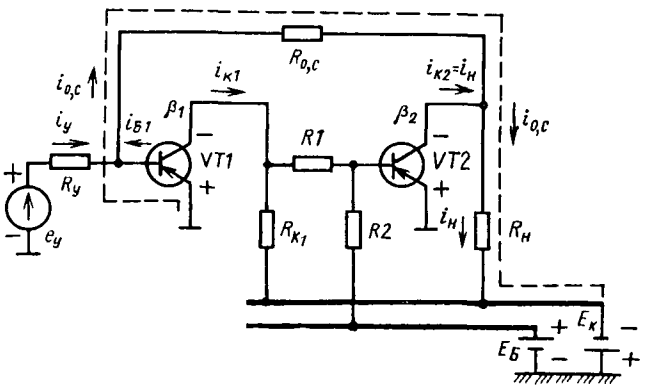


Рис. 12.2. Двухкаскадный транзисторный усилитель с положительной обратной связью

управления. Это дает возможность надежно закрывать транзистор *VT2* в точке O_2 и открывать в точке H_2. При увеличении по модулю отрицательного сигнала управления $-i_у$ транзистор *VT1* открывается, а транзистор *VT2* закрывается. При этом отрицательный потенциал коллектора транзистора *VT2* возрастает.

При наличии обратной связи и увеличении тока управления до значения $-i_{у1}$ транзистор *VT2* находится в состоянии H_2. Напряжение $U_{ЭК2}$ мало, и $i_{о.с}=0$. При $|i_у| > |i_{у1}|$ происходит постепенное закрытие транзистора *VT2*, увеличивается $-U_{ЭК2}$, появляется $i_{о.с}$. Для полного закрытия *VT2* ток в коллекторе *VT1* должен принять значение $I_{К102}$.

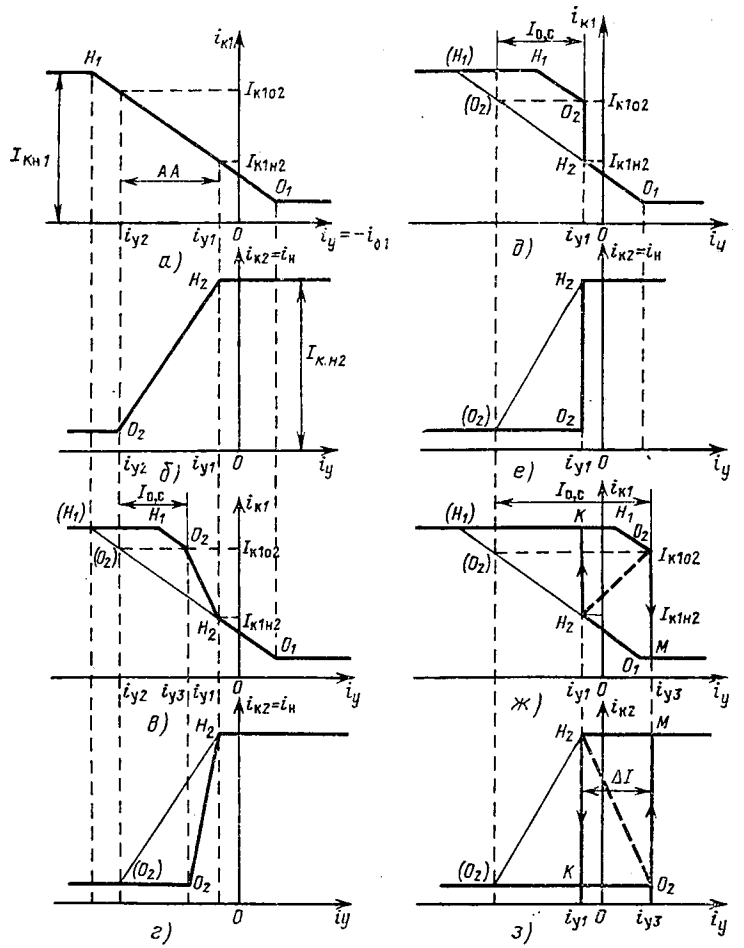


Рис. 12.3. Характеристики управления каскадов усилителя по рис. 12.2

Благодаря току $i_{о.с}$ ток управления $i_{у3}$, необходимый для получения тока $I_{К102}$, уменьшится:

$$| i_{у3} | = | i_{у2} | - I_{о.с}.$$

Состояние транзистора *VT1* изменяется от H_2 до O_2 (рис. 12.3, *в*). В точке O_2 транзистор *VT2* полностью закрыт.

Ток $I_{о.с}$ достигает максимального значения и примерно равен $i_{о.с}=I_{о.с}=E_К/R_{о.с}$, $R_{о.с}\gg R_н$.

При дальнейшем увеличении отрицательного сигнала процесс идет по прямой O_2H_1, параллельной $H_2(H_1)$, так как ток $I_{о.с}$ не меняется. При уменьшении модуля $i_у$ процесс идет в обратном порядке по ломаной $(H_1)H_1O_2H_2O_1$. Для получения точки O_2 на $i_{К1}$ ($i_у$) из точки (O_2) проводим прямую, параллельную оси $i_у$, и на ней откладываем ток $I_{о.с}$. После этого находим точку O_2 на характеристике $i_{К2}$ (рис. 12.3, *г*).

При достаточно малом значении сопротивления $R_{о.с}$ возникает лавинообразный процесс увеличения тока в транзисторе *VT1* и уменьшения тока в транзисторе *VT2*. В результате усилитель переходит в релейный режим работы.

При $R_{о.с}=R_{о.с.кр}$ зависимость входных и выходных величин показана на рис. 12.3, *д* и *е*. При сигнале $i_{у1}$ ток $i_{К1}$ возрастает скачком до $I_{К1О2}$, а ток нагрузки падает до тока отсечки. Транзистор *VT2* закрывается. Ток обратной связи максимален. При дальнейшем возрастании модуля тока $i_у$ процесс в транзисторе *VT1* идет по прямой O_2H_1, параллельной $H_2(H_1)$. Для надежной работы берется $R_{о.с}\ll R_{о.с.кр}$. Значение $R_{о.с}$ определяется требуемой характеристикой реле (коэффициентом возврата). Для $R_{о.с}\ll R_{о.с.кр}$ зависимость входных и выходных величин показана на рис. 12.3, *ж* и *з*. Из-за сильной обратной связи процесс в первом каскаде идет по ломаной $O_1H_2O_2H_1(H_1)$, а во втором — по $H_2O_2(O_2)$. Поскольку режим по $H_2O_2(O_2)$ является неустойчивым, то при $i_{у1}$ ток нагрузки $i_н$ падает по линии H_2K, а ток $i_{К1}$ возрастает до тока насыщения $I_{Кн1}$. При обратном изменении тока управления процесс протекает следующим образом. До тех пор, пока $i_у$ не достигнет значения $i_{уз}$, транзистор *VT2* находится в режиме отсечки и ток обратной связи $I_{о.с}$ обеспечивает поддержание этого режима. При дальнейшем небольшом увеличении тока $i_у$ процесс в *VT2* идет по ломаной O_2H_2M, а в *VT1* — по ломаной O_2H_2M. Из-за неустойчивости режима ток $i_{К1}$ падает до тока отсечки (прямая O_2M), а ток $i_{К2}$ возрастает до $I_{Кн2}$ (прямая O_2M).

По аналогии с электромагнитными контактными реле ток $i_{у1}$ называется током отпускания, а ток $i_{уз}$ — током срабатывания. Ширина релейной петли

$$\Delta I = i_{уз} - i_{у1} = i_{уз} + |i_{у1}|.$$

Для получения релейного режима необходимо, чтобы

сопротивление резистора обратной связи $R_{о,с}$ было меньше критического значения:

$$R_{о,с} \leqslant R_{о,с,кр} = \frac{R_у R_н \gamma\beta_1\beta_2}{R_у + r_{эБ1}} = \frac{R_н \gamma\beta_1\beta_2}{1 + r_{эБ1}/R_у}, \qquad (12.3)$$

где $\gamma = R_{К1}/(R_{К1}+R_1)$; β_1 и β_2 — коэффициенты усиления по току транзисторов *VT1* и *VT2*; $r_{эБ1}$ — сопротивление между эмиттером и базой транзистора *VT1*.

Если $(r_{эБ1}/R_у) \to \infty$ (источник сигнала имеет малое сопротивление), то $R_{о,с,кр} \to 0$. В этом случае неравенство (12.3) соблюсти невозможно и релейный режим осуществить нельзя. Для получения релейного режима в данной схеме источник сигнала должен иметь большое внутреннее сопротивление ($R_у \gg r_{эБ1}$), т. е. быть источником тока.

Условие релейного режима принимает вид

$$R_{о,с} < R_{о,с,кр} = R_н \gamma\beta_1\beta_2.$$

Ток переключения в этом случае

$$I_{у,п} = \frac{E_К}{R_{о,с}}\left(1 - \frac{R_{о,с}}{\gamma\beta_1\beta_2 R_н}\right). \qquad (12.4)$$

Существуют схемы полупроводниковых реле, управляемые от источника напряжения или вообще малочувствительные к его внутреннему сопротивлению [6.1].

12.2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО РЕЛЕ

а) **Сопротивление обратной связи** $R_{о,с}$. В состоянии срабатывания транзистор *VT2* насыщен (см. рис. 12.2), напряжение $U_{эКн2}$ мало и ток $i_{о,с} = 0$. Поэтому при изменении сопротивления $R_{о,с}$ ток управления при отпускании $I_у^о$ остается неизменным. В состоянии отпускания транзистор *VT2* закрыт, ток обратной связи максимален $I_{о,с} = E_К/R_{о,с}$ ($R_н \ll R_{о,с}$). При уменьшении сопротивления $R_{о,с}$ ток обратной связи возрастает.

Ток базы транзистора *VT1* при срабатывании

$$i_{Б1}^с = I_{К1}^с/\beta_1 = -i_у^с + I_{о,с} \qquad (12.5)$$

и является неизменной величиной. При уменьшении $R_{о,с}$ возрастает ток $I_{о,с}$, что ведет к увеличению тока $-i_у^с$ согласно (12.5). Релейная петля при этом расширяется.

При возрастании $R_{о,с}$ ток $i_{о,с}$ уменьшается, и при большом значении $R_{о.с}$ ток $i_у^с$ может даже изменить знак ($i_у^с < 0$).

При малом $R_{о,с}$ усилитель переходит в режим самоблокировки (рис. 12.3, *з*). Режим самоблокировки характеризуется тем, что после достижения точки (O_2) (рис. 12.3, *з*) ток управления может быть полностью снят. При этом ток в нагрузке остается равным току отсечки транзистора *VT2*. Для того чтобы перевести транзистор *VT2* в открытое состояние, необходимо подать сигнал $i_{уз}$.

Для обеспечения режима самоблокировки должно соблюдаться условие

$$R_{о,с} \leqslant R'_{о,с,кр} = \frac{E_К R_у}{I^о_у R_у + U^о_{ЭБ1}},$$

где $U^о_{ЭБ1}$ — напряжение эмиттер — база транзистора *VT1* при отпускании реле.

При таком сопротивлении после срабатывания реле транзистор *VT1* находится в состоянии отсечки.

На рис. 12.4, *а* показана зависимость напряжения управления $U^о_у$ и $U^с_у$ от сопротивления $R_{о,с}$ для одной из схем полупроводникового реле.

б) **Сопротивление источника управления** $R_у$. Уменьшение $R_у$ приводит к уменьшению напряжения срабатывания и отпускания. Ширина релейной петли уменьшается, и при $R_у = R_{у,кр}$ релейный режим исчезает

$$R_{у,кр} = \frac{r_{ЭБ1} R_{о,с}}{\gamma \beta_1 \beta_2 R_н - R_{о,с}}.$$

На рис. 12.4, *б* показана зависимость напряжения $U^а_у$ и $U^о_у$ от $R_у$.

в) **Напряжение питания** $E_К$. Обычно для питания цепей коллекторов и баз транзисторов используется общий источник питания. Деление напряжения производится с помощью стабилитронов (на рис. 12.2 не показаны). Можно считать, что $E_К/E_Б = \text{const}$. С изменением напряжения питания токи $I^с_у$, $I^о_у$ и $I_{у,п}$ изменяются примерно пропорционально этому напряжению. При некотором достаточно малом по сравнению с номинальным значении $E_К$ может происходить ложное срабатывание реле. Пусть данное реле при номинальном напряжении питания находится в отпущенном состоянии и $R_{о,с} < R_{о,с,кр}$ (рис. 12.3, *з*). При уменьшении напряжения питания $I^с_у$ будет уменьшаться, пока не достигнет нулевого значения. Поскольку сигнал управления в цепи базы транзистора *VT1* равен нулю, произойдет самопроизвольное срабатывание реле. Если напряже-

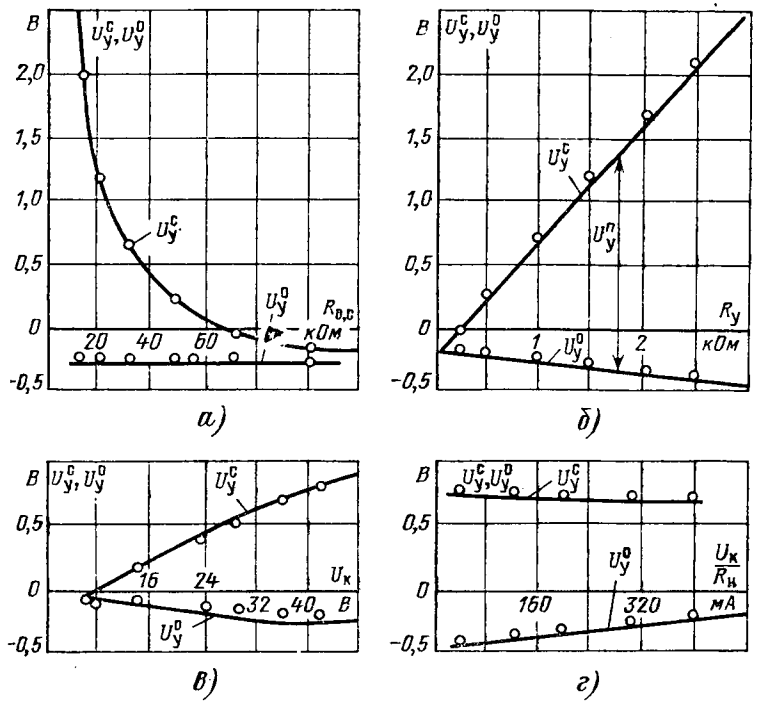


Рис. 12.4. Зависимость напряжения срабатывания $U_у^с$ и отпускания $U_у^о$ от различных факторов

ние питания снова поднимется до номинального значения, то реле все равно останется в положении срабатывания.

Для предотвращения ложного срабатывания самое низкое значение питающего напряжения должно удовлетворять неравенству

$$E_к > (I_у^о + U_{эб1}^о / R_у) R_{о.с}.$$

Зависимость напряжения срабатывания и отпускания от напряжения питания представлена на рис. 12.4, *в*. При напряжении 7 В происходит ложное срабатывание реле.

г) **Сопротивление нагрузки** $R_н$. В состоянии отпускания реле транзистор *VT2* находится в режиме О и ток обратной связи определяется сопротивлениями $R_{о.с}$ и $R_н$. Поскольку $R_{о.с} \gg R_н$, то $R_н$ не оказывает влияния на ток обратной связи $I_{о.с}$, а следовательно, и на ток срабатывания $I_у^с$.

В состоянии срабатывания через $R_н$ протекает ток нагрузки, равный $I_н = E_К/R_н$. Транзистор *VT2* насыщен. При увеличении $R_н$ уменьшается ток $I_{Кн2} = I_н$. При этом уменьшается и ток базы $i_{Б2} = I_{Кн2}/\beta_2$, создающий насыщение транзистора *VT2*. Для создания тока $i_{Бн2}$ необходимо большее открытие транзистора *VT1*, что требует увеличения тока базы $i_{Б1}$, а следовательно, увеличения отрицательного напряжения отпускания $U_у^о$ ($U_у^о < 0$).

Таким образом, при увеличении сопротивления нагрузки $R_н$ напряжение срабатывания $U_у^с$ не меняется, а напряжение отпускания $U_у^о$ возрастает (по модулю). На рис. 12.4, *г* представлена зависимость $U_у^с$ и $U_у^о$ от $E_К/R_н = U_К/R_н$ при $E_К = \text{const}$.

На работу реле значительное влияние оказывает разброс параметров транзисторов, что необходимо иметь в виду при расчете схемы. При надлежащем выборе параметров схемы и стабилизации источника питания (± 10 %) реле обеспечивает высокую надежность работы [6.1].

12.3. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

а) **Общие сведения.** В электрических аппаратах широко применяются операционные усилители (ОУ) [12.1]. ОУ (рис. 12.5) имеет интегральное исполнение и содержит входной дифференциальный усилитель, промежуточный усилитель и эмиттерный повторитель. Входной дифференциальный каскад содержит два транзистора, на входы которых подаются сигналы $U_{вх,и}$ и $U_{вх,н}$. Выходное напряжение каскада является разностью потенциалов на коллекторных нагрузках этих транзисторов. Такой каскад имеет высокое входное сопротивление и позволяет получить самые разнообразные характеристики вход—выход. Питание ОУ осуществляется от источника с напряжением $\pm U_{пит}$ относительно заземленной шины. В дальнейшем подвод питания к ОУ на рисунках не показывается.

Входной усилитель имеет инвертирующий $U_{вх,и}$ и неинвертирующий $U_{вх,н}$ входы. Выход ОУ $U_{вых}$ реагирует на разность потенциалов, приложенных ко входам $U_{вх,и}$ и $U_{вх,н}$. Если заземлить $U_{вх,и}$ и подать положительное приращение напряжения на $U_{вх,н}$, то на выходе появится положительное приращение сигнала. При подаче на инвертирующий вход положительного приращения напряжения на выходе происходит отрицательное приращение сигнала.

Наличие двух каналов позволяет использовать ОУ для решения различных логических задач.

Выходные характеристики ОУ показаны на рис. 12.6. Характеристика каждого канала снимается при заземленном втором входе ОУ. На линейном участке характеристики ОУ имеет большой коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{ноу}} = \Delta U_{\text{вых}}/\Delta U_{\text{вх}}$, доходящий до 10^5 и выше при большом входном сопротивлении.

Применение на выходе ОУ эмиттерного повторителя снижает выходное сопротивление и делает возможным подключение нагрузки с малым сопротивлением. Из-за влияния температуры и разброса параметров элементов ОУ при нулевом входном сигнале наблюдается небольшой разбаланс $\pm\Delta U_{\text{вых}}$, который можно устранить с помощью смещения.

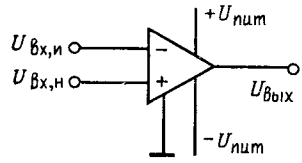


Рис. 12.5. Обозначение операционного усилителя

Для защиты от больших входных сигналов на входе ОУ включаются два встречно-параллельно включенных диода или стабилитрона.

б) **Применение ОУ.** В инвертирующем усилителе (рис. 12.7) с помощью резистора $R_{\text{о,с}}$ введена отрицательная обратная связь. Поскольку ОУ имеет высокий коэффициент усиления K_U, то входное напряжение $U_{\text{вх}} = U_{\text{о}} = U_{\text{вых}}/K_U \to 0$. Точка *1* имеет относительно земли нулевой потенциал и изолирована от нее (кажущаяся земля). Входное сопротивление $R_{\text{вх}} \to \infty$.

Тогда

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} R_1; \quad I_{\text{о,с}} R_{\text{о,с}} = -U_{\text{вых}};$$

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{о,с}}; \quad U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{о,с}}}{R_1}; K_U = -R_{\text{о,с}}/R_1.$$

Таким образом, коэффициент усиления равен отношению $R_{\text{о,с}}/R_1$. Если $R_{\text{о,с}} = R_1$, то ОУ работает как инвертирующий повторитель $K_U = -1$. Выходное напряжение равно входному с обратным знаком. При этом выходное сопротивление усилителя близко к нулю [12.1].

Обратная связь обеспечивает независимость K_U от разброса параметров элементов схемы и его стабильность при колебаниях температуры.

В неинвертирующем усилителе (рис. 12.8) отрицательная обратная связь вводится по инвертирующему входу,

а сигнал подается на неинвертирующий вход. Поскольку $U_0 \to 0$, то входное напряжение

$$U_{вх} = U_{вых} R_1/(R_1 + R_{о,с}).$$

Тогда

$$K_U = U_{вых}/U_{вх} = 1 + R_{о,с}/R_1.$$

При $R_{о,с} = 0$ и $R_1 = \infty$ усилитель работает как повторитель.

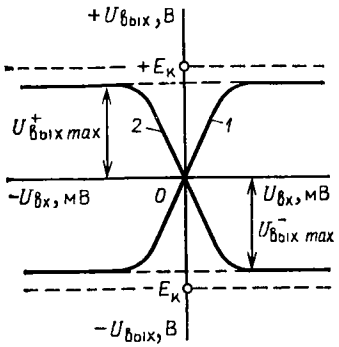


Рис. 12.6. Выходные характеристики ОУ:

1 — для неинвертирующего входа; *2* — для инвертирующего входа

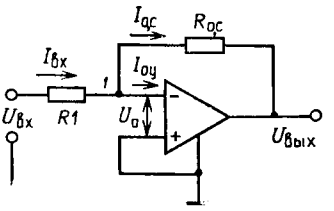


Рис. 12.7. Инвертирующий ОУ с отрицательной обратной связью

Схема инвертирующего сумматора (рис. 12.9) является развитием схемы рис. 12.7. На входе включается n резисторов, равных по величине.

При $I_{вхОУ} = 0$ ($R_{вхОУ} = \infty$)

$$I_{о,с} = I_1 + I_2 + \ldots + I_n = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \ldots + \frac{U_n}{R_n};$$

$$U_{вых} = -I_{о,с} R_{о,с};$$

$$U_{вых} = -\left(\frac{R_{о,с}}{R_1} U_1 + \frac{R_{о,с}}{R_2} U_2 + \ldots + \frac{R_{о,с}}{R_n} U_n\right),$$

При $R_1 = R_2 = \ldots = R_n$

$$U_{вых} = -\frac{R_{о,с}}{R_n}(U_1 + U_2 + U_n).$$

Выходное напряжение равно сумме входных напряжений

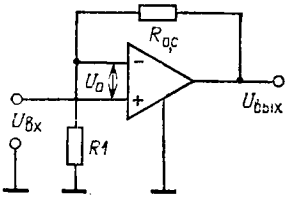


Рис. 12.8. ОУ с отрицательной обратной связью и неинвертирующим входом

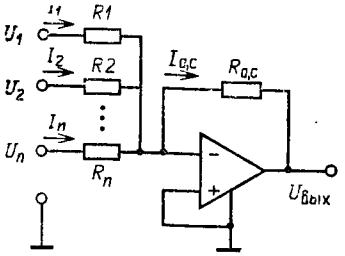


Рис. 12.9. Сумматор на операционном усилителе

с обратным знаком, умноженной на коэффициент усиления ОУ.

Схема неинвертирующего сумматора основывается на схеме рис. 12.8.

Схема интегратора (рис. 12.10) получается из схемы рис. 12.7 заменой резистора $R_{o.c}$ конденсатором C. Учитывая, что

$$u_{вх} = i_R R;\ \frac{1}{C}\int_0^t i_C\,dt = u_C = -u_{вых} \text{ и } i_R = i_C,$$

будем иметь

$$u_{вых} = -\frac{1}{C}\int_0^t i_C\,dt = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_{вх}\,dt +$$

$$+ u_{вых0} = -\frac{1}{T}\int_0^t u_{вх}\,dt + u_{вых0},$$

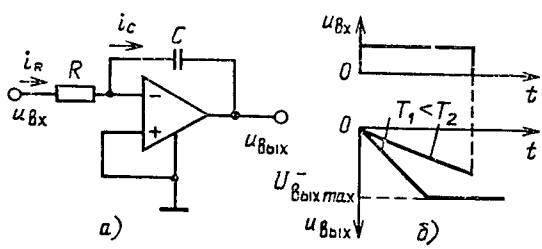


Рис. 12.10. Интегратор на операционном усилителе

где $T = RC$ — постоянная интегрирования; $u_{вых0}$ — выходное напряжение при $t=0$.

Изменение входного и выходного напряжения показано на рис. 12.10, *б*.

В схеме дифференциатора (рис. 12.11) ток через конденсатор $i_C = Cdu_{вх}/dt$. Поскольку $u_{вых} = -i_C R_{о,с}$, имеем

$$u_{вых} = -RCdu_{вх}/dt.$$

Для сравнения полезного сигнала с опорным, который может быть нулем, положительной или отрицательной величиной, применяется компаратор (рис. 12.12, *а*). На инвертирующий вход ОУ подается сигнал, на неинвертирующий — положительная обратная связь через резисторы *R1* и *R2*. Усилитель работает в линейном режиме. Если сигнал на входе равен нулю, то $U_{вых} = U^{+}_{вых\,max}$ (рис. 12.12, *б*). При входном сигнале $U_{вх} = U_{ср}$ сигнал на выходе скачкообразно меняется до $U^{-}_{вых\,max}$. При $U_{вх} = U_{отп}$ происходит возврат к начальному состоянию. Здесь опорное напряжение равно нулю. На рис. 12.13, *а* показан компаратор с положительным опорным напряжением. Выходная характеристика имеет вид, показанный на рис. 12.13, *б*. Ширина релейной петли гистерезиса определяется уравнением

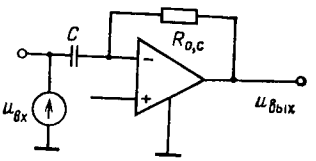


Рис. 12.11. Дифференциатор на операционном усилителе

$$U_г = U_{ср} - U_{отп} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}\left(U^{+}_{вых\,max} - U^{-}_{вых\,max}\right).$$

Эта схема выполняет функцию триггера Шмидта или порогового элемента. Если опорное напряжение $U_{оп} = 0$, то характеристика принимает вид рис. 12.12, *б*.

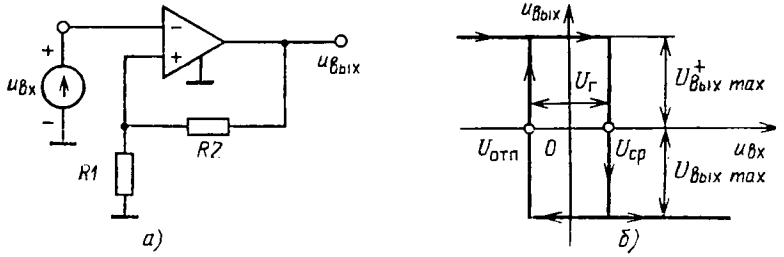


Рис. 12.12. Компаратор на операционном усилителе

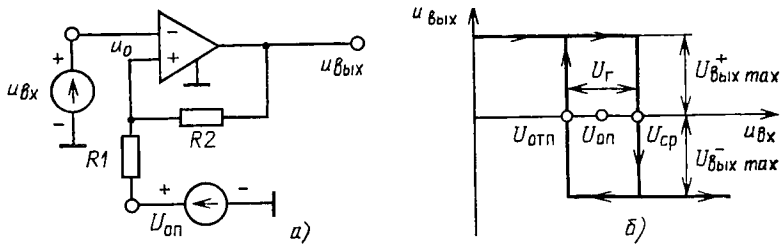


Рис. 12.13. Компаратор на ОУ в релейном режиме с опорным напряжением

12.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЛЕ

а) **Общие сведения.** Полупроводниковые реле в отношении быстродействия, чувствительности, селективности и надежности превосходят электромагнитные. В ряде случаев полупроводниковые реле обладают характеристиками, которые невозможно получить с помощью электромагнитных реле.

Полупроводниковые реле защиты содержат измерительный орган и логическую часть. В измерительном органе

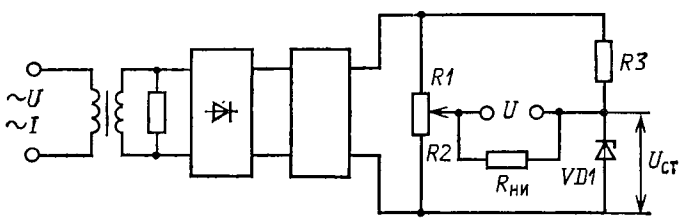


Рис. 12.14. Измерительный орган со стабилитроном

непрерывные входные величины преобразуются в дискретный выходной сигнал. Дискретный выходной сигнал поступает на вход логической части, выдающей управляющий сигнал чаще всего на электромагнитное реле.

Измерительный орган полупроводникового реле тока обычно имеет на входе трансформатор тока, нагруженный на малое активное сопротивление. Напряжение на этом сопротивлении пропорционально первичному току в контролируемой сети.

В измерительных органах используются следующие три принципа:

1) сравнение однородных физических величин, например напряжений. В момент равенства измеряемого и опорного напряжений на выходе появляется нулевой сигнал, который приводит к срабатыванию нуль-органа. На выходе появляется дискретный сигнал. Регулируя опорное напряжение, можно менять уставку срабатывания. Реализация такого принципа показана на рис. 12.14 [12.2]. Выпрямленный сигнал, пропорциональный напряжению или току, подается на мост *R1*, *R2*, *R3*, *VD1*. В момент равенства напряжений на *R2* и *VD1* на выходе моста появляется нулевой сигнал, который приводит в действие нуль-орган. Главным источником погрешности полупроводниковых реле является зависимость параметров полупроводниковых приборов от температуры. Поэтому в схемы вводится температурная компенсация. В данной схеме для температурной компенсации последовательно со стабилитроном *VD1* включается в прямом направлении диод. С ростом температуры у стабилитрона падение напряжения растет, а у диода в проводящем направлении падает;

2) проявление физического эффекта, возникающего при определенном значении измеряемого напряжения, — скачок в нелинейной характеристике туннельного диода, релейная характеристика триггера Шмидта и др.;

3) преобразование непрерывного входного сигнала и опорного напряжения в цифровую форму. После этого производится сравнение входного сигнала с опорным напряжением. Обработка входного сигнала в цифровой форме может производиться по требуемому алгоритму вычислительного устройства. Последний принцип наиболее перспективен ввиду высокой универсальности и стремительного развития вычислительной техники.

Функциональная схема трехфазного полупроводникового реле тока представлена на рис. 12.15. Пропорциональные токам напряжения трех фаз подводятся к промежуточным трансформаторам *T1—T3*. Между первичной и вторичной обмотками установлен экран. На выходе трансформаторов включены нелинейные резисторы. Эти мероприятия защищают усилители ОУ от перенапряжений. Сигнал со вторичных обмоток трансформаторов, пропорциональный контролируемому току, подается на входы ОУ *A1—A3*. На эти же усилители подается опорное напряжение с резистора *R* (§ 12.3). Входные и опорные напряжения сравнива-

ются между собой. При их равенстве на выходе усилителей *A1—A3* появляется выходной сигнал, который через элемент ИЛИ (§ 12.6), блок расширения импульса *A5* и оконечный усилитель *A4* подается на исполнительный орган. В блоке *A5* кратковременный импульс преобразуется в импульс большей длительности. Светоизлучающие диоды *VD1—VD3* сигнализируют о фазе, в которой произошла перегрузка.

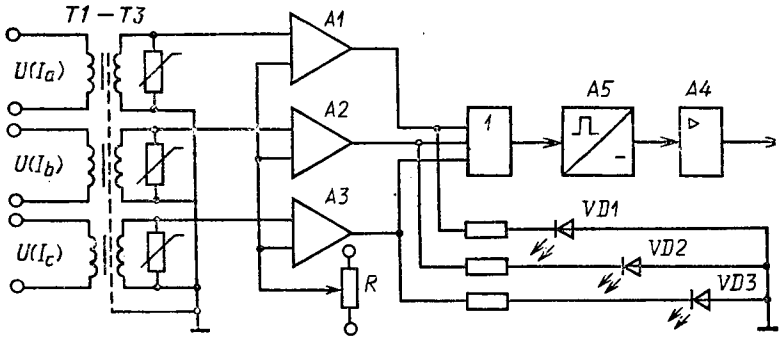


Рис. 12.15. Трехфазное полупроводниковое реле тока

Для того чтобы схема не реагировала на кратковременные и безопасные для защищаемой цепи перегрузки, вводится выдержка времени (рис. 12.16). Для этого один сигнал с элемента ИЛИ подается на элемент И непосредственно, второй — с выдержкой времени, определяемой цепочкой *R1, C1*. Сигнал на выходе реле появляется только тогда, когда на элемент И придут оба сигнала (§ 12.6).

б) **Реле тока с выдержкой времени, зависящей от тока.** В таких реле используются и аналоговые, и дискретные схемы. На рис. 12.17 в качестве примера показана функциональная схема полупроводникового токового расцепителя автоматического выключателя серии «Электрон». Напряжения, пропорциональные токам в фазах, через промежуточные трансформаторы подаются на выпрямитель, после чего поступают на резисторы *R1, R2, R4*. Пропорциональный току сигнал $U(I)$ с *R1* подается на суммирующий блок U_Σ, на который приходит сигнал $U(t)$, снимаемый с цепочки временно́й задержки *R3, C1*. Канал сигнала $U(t)$ начинает работать, когда под действием тока

перегрузки срабатывает полупроводниковое реле *К1*. Когда суммарный сигнал U_Σ достигает порога срабатывания полупроводникового реле *К3*, оно выдает сигнал на тиристорный усилитель *А*, воздействующий на обмотку электромагнита расцепителя *К5*.

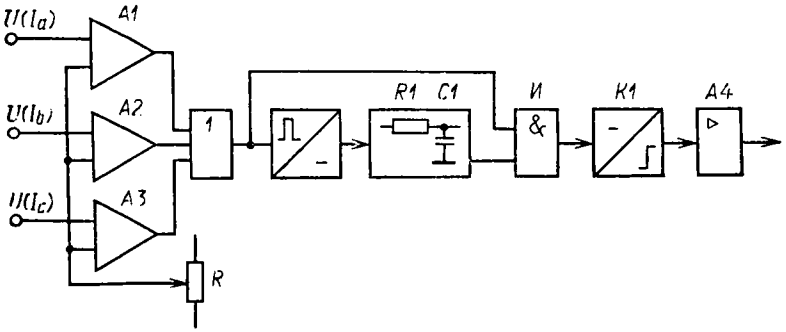


Рис. 12.16. Реле тока с выдержкой времени

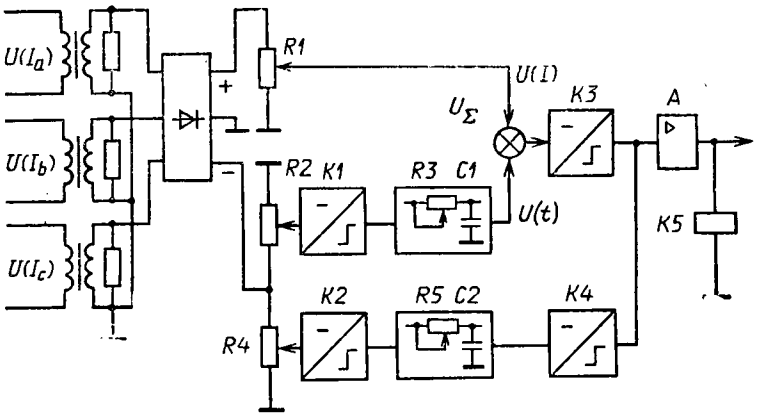


Рис. 12.17. Полупроводниковый расцепитель для управления автоматическим выключателем серии «Электрон»

Процесс срабатывания реле поясняется на рис. 12.18. Пусть $U_п$ — пороговое напряжение, при котором происходит срабатывание реле *К3*. Это напряжение равно сумме напряжения $U(I)$, пропорционального току, и напряжения $U(t)$, получаемого от элемента задержки *R3—C1* (см. рис. 12.17). Пусть ток $I_1 < I_2$, тогда $U_1(I) < U_2(I)$. Соответствен-

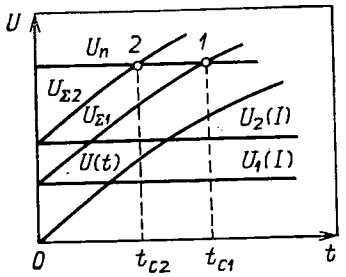


Рис. 12.18. К работе расцепителя с зависимой характеристикой времени срабатывания

но кривая $U_{Σ1}=U(t)+U_1(I)$ идет ниже кривой $U_{Σ2}=U(t)+$ $+U_2(I)$. При этом кривая $U_{Σ2}$ пересечет прямую $U_п$ раньше (точка *2*), чем кривая $U_{Σ1}$ (точка *1*). Соответственно получаем при токе I_1 выдержку времени t_{c1} и при токе $I_2>$ $>I_1$ выдержку времени $t_{c2}<t_{c1}$. Выдержка времени зависит от тока перегрузки. При токах КЗ работает канал *R4*, *K2*, *R5*, *C2*, *K4*. Уровень тока срабатывания регулируется потенциометром *R4*, а время срабатывания — резистором *R5*. Недостатком реле является сложность регулировки.

в) **Реле защиты от замыканий на землю.** Реле применяется в схемах защиты при замыканиях на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыкания на землю [12.3]. Основные параметры реле: ток срабатывания регулируется в пределах 0,02—0,12 А; коэффициент возврата не менее 0,93; коммутируемое напряжение не более 250 В; механическая износостойкость 10^4 циклов; электрическая износостойкость не менее 10^3 циклов.

Схема реле представлена на рис. 12.19. Измерительный орган реле содержит промежуточный трансформатор *TA* и резисторы *R2*—*R7*, которые вместе с выключателями *SB1*—*SB5* служат для дискретной регулировки тока срабатывания. При отключенных выключателях ток срабатывания реле минимален. По мере включения *R3*—*R7* уменьшается напряжение на выходе операционного усилителя *A1* и ток срабатывания увеличивается. Диоды *VD1*—*VD4* служат для ограничения сигнала на входе *A1*. При большом входном сигнале трансформатор *TA* насыщается и его входное сопротивление падает. Резистор *R1* ограничивает ток в цепи трансформатора *TA*.

Операционный усилитель *A1* работает как активный фильтр. Многоконтурная отрицательная обратная связь с помощью резисторов *R8*, *R9*, *R10* и конденсаторов *C1*, *C2*

позволяет отфильтровать высшие гармоники в сигнале и оставить основную частоту 50 Гц [12.4].

Сравнивающая часть реле состоит из порогового элемента на операционном усилителе *A2*, время-измерительной цепи *VD5*, *R15*, *R16*, *C8* и триггера Шмидта на операционном усилителе *A3*. Конденсаторы *C3—C10* служат для стабилизации работы усилителя, исключая его самовозбуждение. Резистор *R17* создает положительную обратную связь. Выходной каскад реле выполнен на транзисторе *VT1*, в цепь коллектора которого включено быстродействующее электромагнитное реле *K*.

Питание схемы осуществляется от сети постоянного тока (контакты *4*, *1* при напряжении 220 В и *4*, *2* при напряжении 110 В) или от сети переменного тока 100 В (контакты *4*, *3*). С помощью стабилитронов *VD6* и *VD7* получаются два симметричных напряжения —15 В и +15 В для питания операционных усилителей.

Порог срабатывания порогового элемента определяется резисторами *R11—R14*. Настройка реле на минимальную уставку производится резистором *R11*.

г) **Реле защиты асинхронных двигателей** (РЗД). Реле (рис. 12.20) обеспечивает защиту асинхронных двигателей от больших перегрузок и неполнофазных режимов. В цепи вторичных обмоток трансформаторов тока через мосты *V1—V3* включены нагрузочные резисторы, напряжения на которых пропорциональны токам двигателя. Конденсаторы *C1—C3* сглаживают пульсации напряжения. Эти напряжения через диоды *VD1—VD3* приложены к потенциометру *R1*, напряжение с которого поступает на пороговый элемент *K1*. Если токи в фазах двигателя не превышают номинальное значение, то напряжение на входе *K1* недостаточно для его срабатывания. Если токовая перегрузка превышает допустимую, то *K1* срабатывает и запускает промежуточное реле *K4*, которое подает сигнал на цепь задержки *R4*, *C4*. Напряжение с конденсатора *C4* подается на пороговый элемент *K3*, усилитель *A* и выходное электромагнитное реле *K*, контакты которого включены в цепь катушки пускателя или электромагнитного расцепителя автомата.

Если длительность перегрузки меньше, чем время задержки в цепи *R4*, *C4*, то двигатель не отключается. При нормальном пуске или допустимой технологической перегрузке благодаря наличию цепи задержки двигатель не отключается. Если длительность перегрузки больше, чем

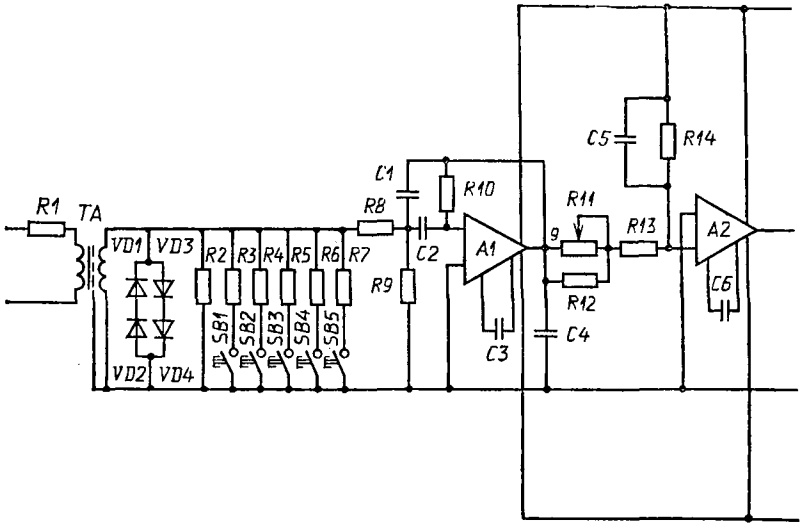


Рис. 12.19. Реле защиты от замыканий на землю

время задержки, то двигатель обесточивается. При обрыве одной фазы, например фазы *A*, пропадает напряжение на нагрузочном резисторе *R3* этой фазы. Поскольку фазы *B* и *C* остались под током, то на выходе *MN* имеется напря-

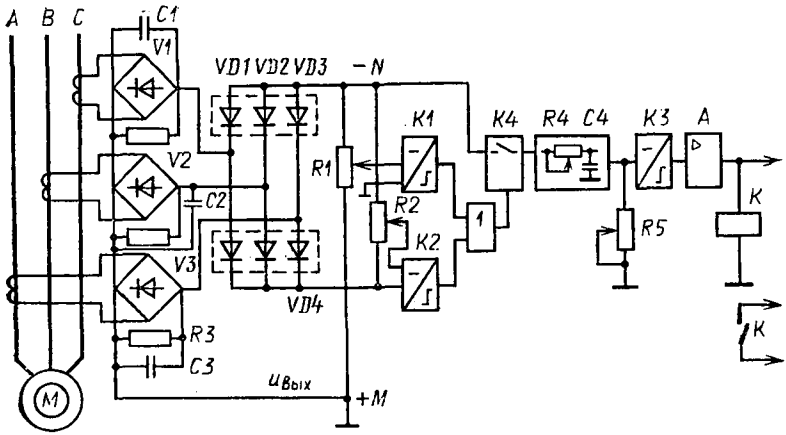
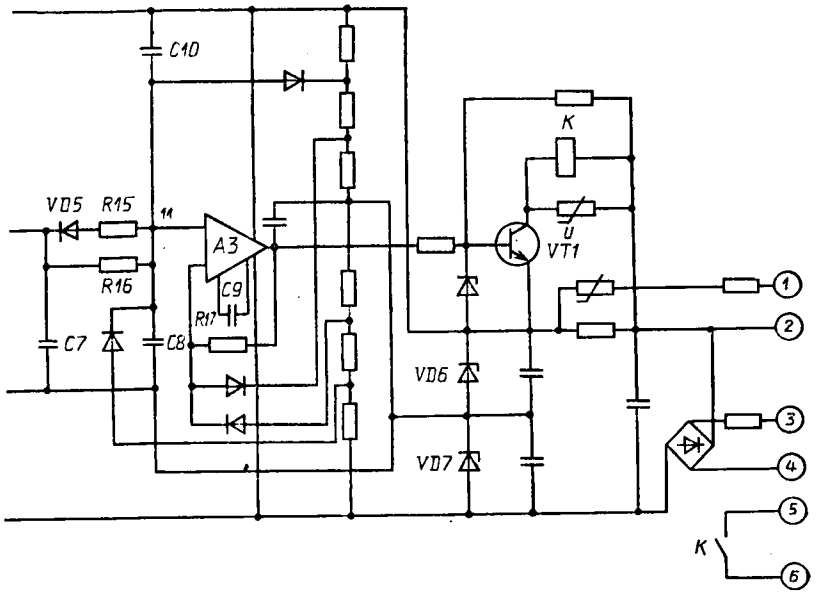


Рис. 12.20. Реле защиты асинхронных двигателей



жение $U_{вых}$ указанной полярности. Под действием этого напряжения протекает ток через резистор *R3*, диод *VD4*, который открывается, и потенциометр *R2*. Напряжение с потенциометра *R2* прикладывается к пороговому элементу *K2*, который срабатывает. После этого действует цепочка *K4*, *R4*, *C4*, *K3*, *Л*, *K* и происходит отключение двигателя.

д) **Трехфазные реле напряжения.** В схеме трехфазного реле напряжения (рис. 12.21) напряжение срабатывания регулируется резистором *R1*. Реле может работать как максимальное (переключатель *S* в положении *1*) и как минимальное (переключатель *S* в положении *2*). Коэффициент возврата реле регулируется в широком диапазоне с помощью резистора *R2*, которым изменяется коэффициент положительной обратной связи в усилителях *A1*, *A2*, *A3*. Логический элемент И обеспечивает срабатывание реле в случае, когда напряжение хотя бы в одной фазе падает ниже допустимого (при *S* в положении *2*).

Для защиты электродвигателей, тиристорных преобразователей, других трехфазных потребителей при недопу-

стимом снижении симметричного напряжения, асимметрии междуфазных напряжений, обратном чередовании фаз служит реле ЕЛ-10-1 (с выдержкой времени) и ЕЛ-10-2 (без выдержки времени). Структурная схема этого реле приведена на рис. 12.22. На входе реле включены пороговые элементы *ПЭ1*, *ПЭ2*, *ПЭ3*, образующие пороговый блок *ПБ*. С выхода *ПБ* система полученных в нем прямоугольных импульсов (рис. 12.23) поступает в логический блок *ЛС*, на триггеры *Т1*, *Т2* и логический элемент И (§ 12.8). Полученная в *ЛС* система прямоугольных импульсов через дифференцирующую цепочку *RC* подается на схему вре-

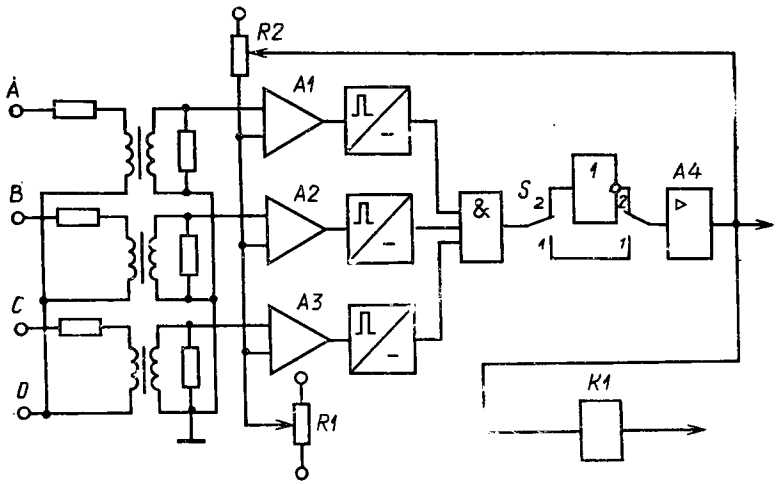


Рис. 12.21. Трехфазное реле напряжения

менной уставки *СВУ*, которая с выдержкой времени открывает транзистор *VT* выходного усилителя *ВУ*. Если контролируемое напряжение симметрично и близко к номинальному значению, то выходные импульсы *ЛБ* не приводят к срабатыванию *СВУ* и *ВУ*.

Когда изменения трехфазного напряжения или порядка чередования фаз выходят за пределы допустимых, на выходе *ЛС* исчезает показанная на рис. 12.23 последовательность импульсов. При этом по истечении выдержки времени в *СВУ* выдается сигнал на *ВУ* и выходное реле срабатывает. Допустим, исчезло напряжение в фазе *А*. При этом перестает работать триггер *Т1* (§ 12.8) и на выходе логиче-

ского элемента И появится логический 0. Триггер *Т2* тоже перестает переключаться. На выходе *RC*-цепочки сигнал пропадает, на вход *СВУ* и *ВУ* не подается сигнал *ЛС*, и реле *К* отключает цепь. Реле срабатывает при снижении напряжения в одной из фаз до $55-65\,\%\,U_{ном}$ при номинальном напряжении в остальных. При обрыве двух или трех фаз одновременно или при обратном следовании фаз реле срабатывает при напряжении $70-75\,\%\,U_{ном}$. Коэф-

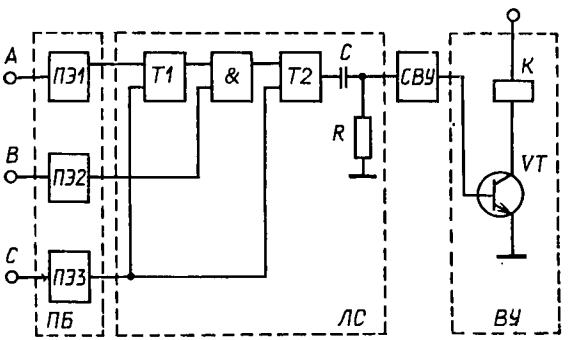


Рис. 12.22. Структурная схема реле напряжения

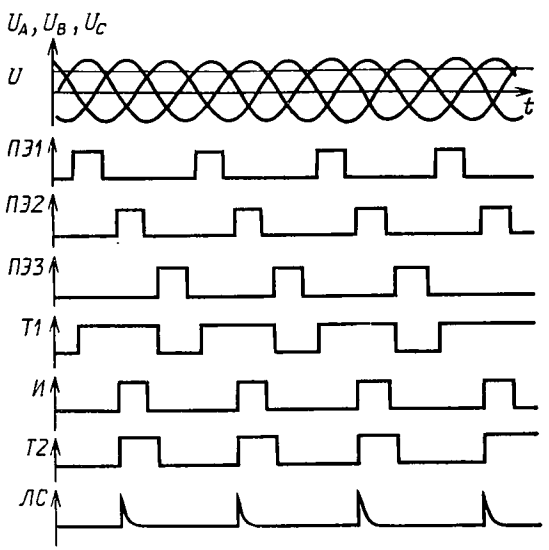


Рис. 12.23. К работе схемы рис. 12.22

фициент возврата реле не менее 0,9. Время срабатывания реле ЕЛ-10-1 не превышает 5 с. Реле не срабатывает при колебании симметричного напряжения в пределах 85—110 % $U_{ном}$.

е) **Полупроводниковые реле времени.** Благодаря большому диапазону выдержек времени (от 0,1 с до 100 ч), высокой надежности и точности, а также малым габаритам в настоящее время эти реле широко распространены. В схеме простейшего полупроводникового реле времени (рис.

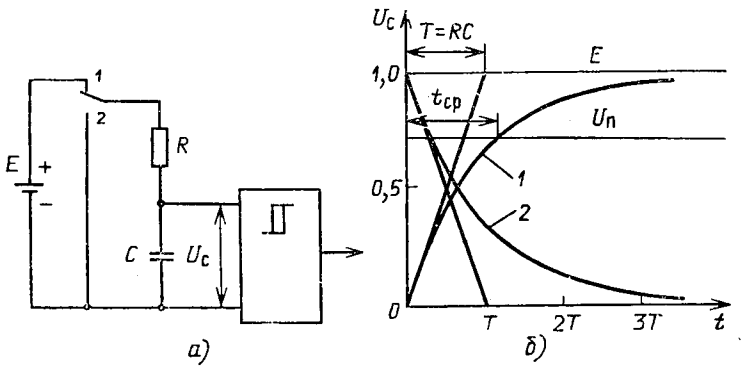


Рис. 12.24. Полупроводниковое реле времени:

а — принципиальная схема; *б* — процессы заряда *1* и разряда *2* конденсатора *C*

12.24) при замыкании контакта *1* напряжение на конденсаторе *C* растет по экспоненте с постоянной времени $T = RC$. Напряжение U_C подается на пороговый элемент. При равенстве U_C пороговому напряжению $U_п$ пороговый элемент срабатывает и с выдержкой времени $t_{ср}$ выдает сигнал на усилитель мощности, который управляет выходным электромагнитным реле. Возможно использование разряда конденсатора (замыкается контакт *2*). Процесс разряда идет по кривой *2* (рис. 12.24, *б*). Такие реле работают на начальных участках кривых *1* и *2*. Выдержку времени регулируют за счет изменения сопротивления *R* (плавно) и емкости конденсатора *C* (скачкообразно). Предельная выдержка времени — до 10 с. При бóльших выдержках времени погрешность реле возрастает, так как экспонента становится пологой. Этим ограничивается выдержка времени таких реле. Для повышения точности заряд конденсатора производят через токостабилизирующее устройство.

При заряде от источника тока и постоянстве зарядного тока напряжение на конденсаторе определяется уравнением

$$U_C = U_{C0} + It/C,$$

где U_{C0} — начальное напряжение на конденсаторе; I — ток заряда.

Схема реле и процесс заряда конденсатора показаны на рис. 12.25. Поскольку напряжение на базе транзистора стабилизировано, то коллекторный ток не зависит от напряжения на коллекторе (генератор тока). Ток заряда устанавливается резистором *R1*. Чем больше ток заряда, тем меньше выдержка времени $t_{ср}$. Стабилитрон *VD* делает неизменным напряжение на резисторе *R1*, что позволяет

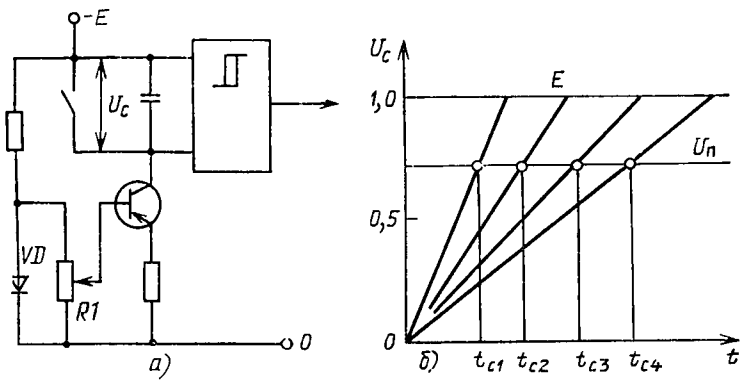


Рис. 12.25. Полупроводниковое реле времени с зарядом конденсатора от источника тока (*а*) и процесс заряда конденсатора (*б*)

получить постоянное время срабатывания при данном положении движка потенциометра.

С целью увеличения выдержки времени можно использовать заряд конденсатора от источника импульсного напряжения (рис. 12.26). На цепочку *R2*, *C2* подается напряжение прямоугольной формы. При каждом импульсе напряжение на конденсаторе поднимается на небольшую величину, после чего во время паузы остается неизменным. Напряжение U_{C2} приложено к пороговому элементу. В момент, когда $U_{C2} = U_п$, реле срабатывает. Такое реле позволяет увеличить выдержку времени. Дело в том, что во время паузы напряжение на емкости U_{C2} не меняется и это

время паузы входит в выдержку времени реле. Тем самым уменьшается погрешность за счет нелинейности кривой заряда. Чем больше скважность импульса $\theta = t_п/(t_п + t_р)$, тем большая выдержка может быть получена.

Грубая регулировка выдержки времени осуществляется изменением частоты импульсов с помощью резистора *R1*, плавная — резистором *R2*.

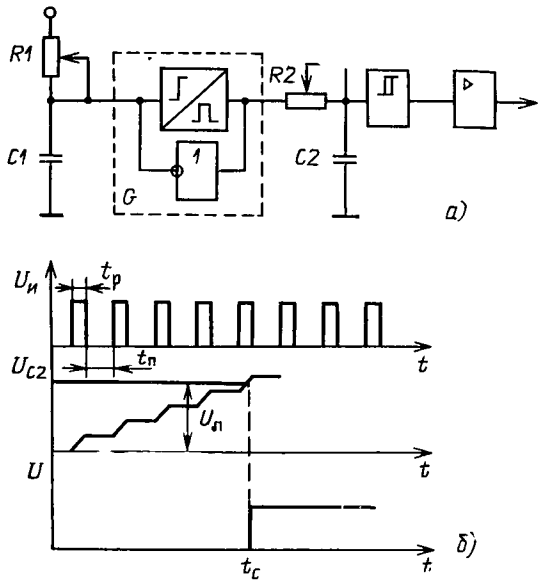


Рис. 12.26. Полупроводниковое реле времени с импульсным зарядом конденсатора (*а*) и диаграмма его работы (*б*)

ж) **Цифровые реле времени.** В цифровом реле времени (рис. 12.27) управляющее устройство *УУ* запускает генератор *G*. Импульсы от генератора *G* подаются на вход несинхронизируемого двоичного счетчика. В момент совпадения кода времени с заданной уставкой сигнал дешифратора *DC* скачкообразно меняется и выходной импульс подается на усилители *A1*, *A2*, *A3*.

После каждого цикла счетчик переводится в нуль. Схема счетчика и временна́я диаграмма его работы даны на рис. 12.28.

JK-триггеры с синхронизирующим входом *C* соединены последовательно (§ 12.8). При подаче импульса на

синхронизирующий вход C первый триггер переключается и на выходе Q_1 появляется логическая единица. Эта единица подается на синхронизирующий вход следующего триггера. Он переключается, и на выходе появляется сигнал Q_2. Затем аналогичным образом переключаются третий и четвертый триггеры с выдачей команд Q_3 и Q_4. Возможны цифровые реле времени без дешифратора.

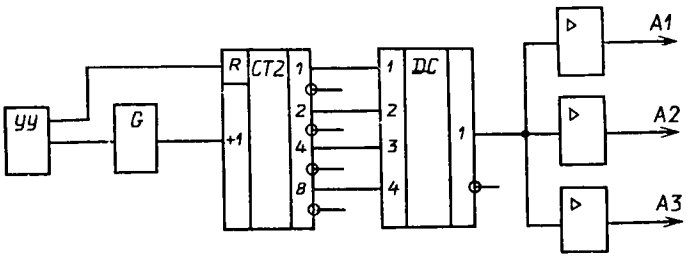


Рис. 12.27. Цифровое реле времени

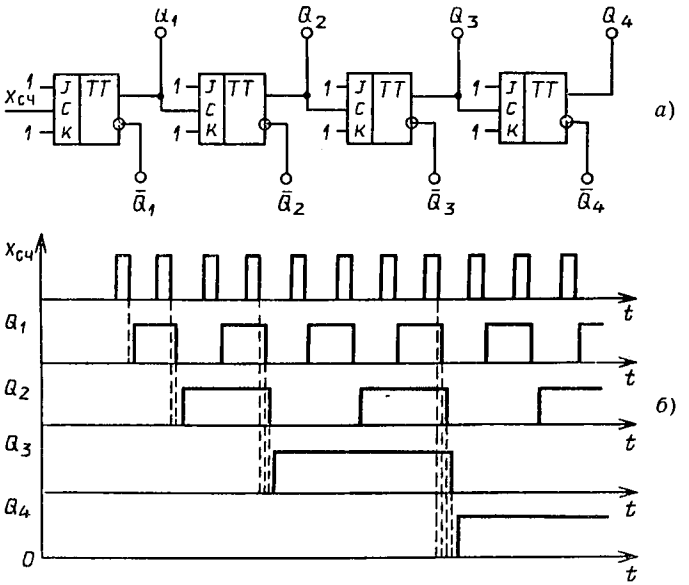


Рис. 12.28. Несинхронизируемый двоичный счетчик с последовательным переносом:

а — функциональная схема; *б* — временна́я диаграмма

На рис. 12.29, *а* показана схема реле времени типов ВЛ-43, ВЛ-44, ВЛ-48, обеспечивающих выдержку времени до 200 с. При подаче напряжения на блок питания *БП* начинается заряд конденсатора *С1* через резистор *R1*. Опорное напряжение на инверсный вход операционного усилителя *А*, работающего в режиме компаратора, подается от делителя *R2—R5*. Когда напряжение на конденсаторе сравняется с опорным, компаратор *А* выдает сигнал на выходной усилитель *ВУ*, который питает выходное реле *К*. Регулирование выдержки времени производится за счет изменения опорного напряжения на инверсном входе *А*. После отключения *БП* конденсатор *С1* разряжается через диод *VD* на резисторы *R2—R5*.

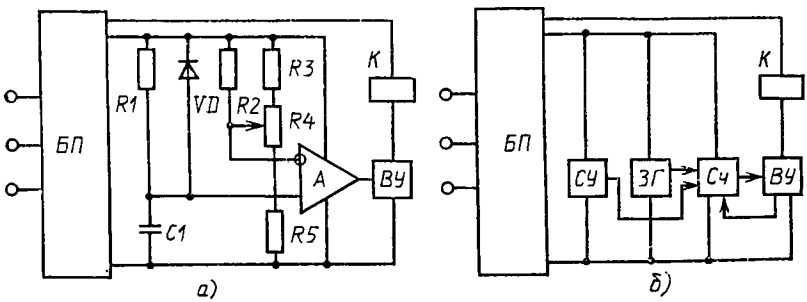


Рис. 12.29. Цифровые реле времени типов:
а — ВЛ-43, ВЛ-44, ВЛ-48; *б* — ВЛ-45, ВЛ-46, ВЛ-47

На рис. 12.29, *б* показана схема реле времени типов ВЛ-45, ВЛ-46, ВЛ-47, предназначенных для получения больших выдержек времени (до 10 ч). При подаче напряжения на блок питания *БП* запускается задающий генератор *ЗГ*, импульсы с которого подаются на счетчик *СЧ*. С помощью схемы установки исходного состояния *СУ* импульсы отсчитываются счетчиком до тех пор, пока их число не будет соответствовать уставке времени. После этого счетчиком выдается сигнал на выходной усилитель *ВУ*, в рабочей цепи которого включено выходное реле *К*. После срабатывания *ВУ* счетчик останавливается. При снятии входного сигнала с блока *БП* реле возвращается в исходное состояние.

Приведенная погрешность описанных реле времени не превышает 5 %. Коммутационная износостойкость составляет не менее $4 \cdot 10^6$ циклов.

12.5. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Тиристоры и транзисторы обладают гальванической связью между цепью управления и нагрузкой. Если такая связь недопустима, то применяются оптоэлектронные приборы (оптроны). В корпусе оптоэлектронного прибора установлены излучающий элемент, обычно фотодиод, и воспринимающий элемент — фототранзистор, фототиристор или фоторезистор. При подаче сигнала на фотодиод он начинает излучать, и его излучение воздействует на воспринимающий элемент, открывая фототранзистор или фототиристор в цепи нагрузки. Электрическое сопротивление

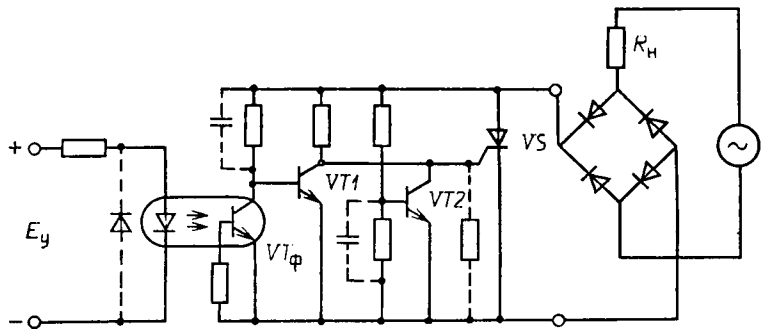


Рис. 12.30. Оптронное реле

между цепями управления и нагрузки составляет 10^{12} Ом, емкость между ними менее 0,1 пФ. Эти свойства оптронов позволяют повысить помехоустойчивость и надежность аппарата, упростить его схему. Оптроны дают малую задержку в срабатывании (1 мкс). На рис. 12.30 показан один из вариантов бесконтактного оптронного реле [4.5]. Нагрузка $R_н$ включается тиристором *VS*, включенным в диагональ моста. Управление тиристором производится с помощью оптопары и транзисторов *VT1*, *VT2*. При отсутствии управляющего сигнала $E_у$ транзистор $VT_ф$ оптрона закрыт, транзистор *VT1* открыт. Сигнал на управляющем электроде *VS* равен нулю, и он закрыт. При подаче сигнала $E_у$ транзистор $VT_ф$ открывается, а *VT1* закрывается. На *VS* подается открывающий потенциал, он открывается и через нагрузку потечет ток. Тиристор *VS* открывается каждый

полупериод. При снятии сигнала $E_у$ *VS* закрывается. Если напряжение питания превысит заданный уровень, то открывается *VT2* и *VS* отключается.

Оптронные реле могут быть выполнены на силовых оптронах (рис. 12.31). Силовые оптроны непосредственно управляют током в нагрузке $R_н$. Светоизлучающие диоды оптронов *VD1* и *VD2* управляются транзистором *VT*. В некоторых схемах управляющий сигнал непосредственно воздействует на светодиоды оптронов. В настоящее время созданы оптотиристоры на ток до 1500 А и напряжение до 4 кВ.

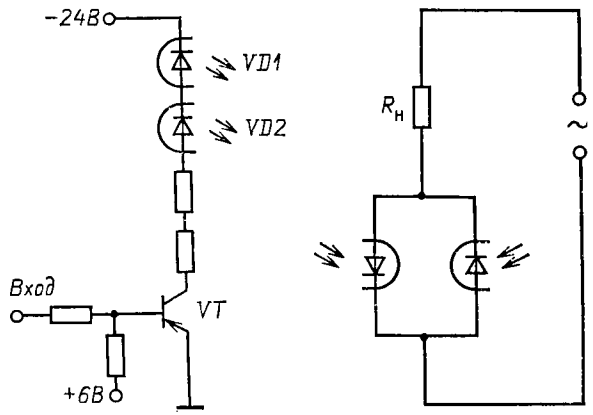


Рис. 12.31. Реле на силовых оптронах

12.6. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Автоматическое управление электроприводом или каким-либо другим электротехническим устройством осуществляется элементами, которые взаимодействуют друг с другом и с управляемым объектом в определенной последовательности. Примерная структура автоматической системы управления показана на рис. 12.32.

Логическая (функциональная) часть предназначена для преобразования сигнала командных органов и датчиков в выходные сигналы в соответствии с заданной программой. Выходные сигналы логической части подаются в усилительные, а затем в исполнительные органы.

В большинстве случаев используются дискретные сигналы, т. е. либо на вход аппарата подается сигнал, значение

которого достаточно для его срабатывания, либо сигнал на вход не подается или он слишком мал и недостаточен для срабатывания. При математическом отображении этого процесса в первом случае говорят, что в аппарат подана логическая единица, во втором — логический нуль.

Логическая часть системы управления состоит из логических элементов дискретного действия, которые или выдают на выходе сигнал (появляется 1), или снимают сигнал с выхода (появляется 0) в зависимости от того, какие сигналы подаются на вход. Функции, выполняемые логическими элементами, и их релейные эквиваленты представлены в табл. 12.1.

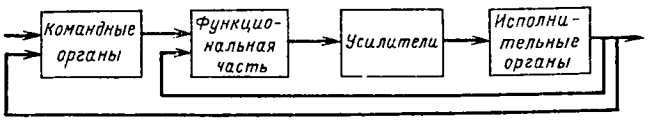


Рис. 12.32. Структура системы автоматического управления

Допустим, логический элемент должен выдать сигнал при условии, что на вход будут одновременно поданы три входных сигнала. Эту функцию выполняет элемент И (табл. 12.1).

Для срабатывания элемента X (электромагнитного реле) необходимо подать сигналы (напряжения) на обмотки трех реле a_1—a_3, которые замкнут свои контакты, изображенные в таблице. При этом поступит напряжение на обмотку реле X. Выходной сигнал появится после замыкания контакта x.

Логические функции, выполняемые элементами, могут быть обозначены алгебраически (табл. 12.1). Так, операция И может быть записана уравнением

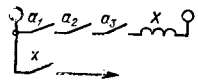
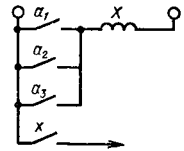
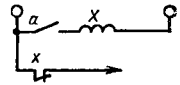
$$x = a_1 a_2 a_3.$$

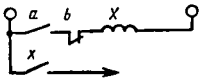
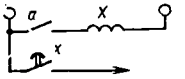
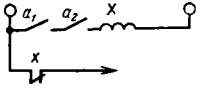
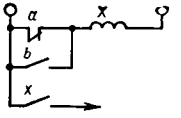
Если отсутствует хотя бы один входной сигнал (допустим, $a_1 = 0$), то выходной сигнал также равен 0.

Содержание более сложных функций и их релейные эквиваленты описаны в [6.1].

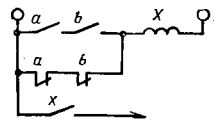
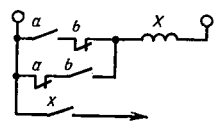
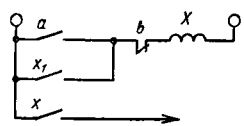
Описанные в табл. 12.1 логические функции чаще всего реализуются на базе магнитополупроводниковых и чисто полупроводниковых элементов. Благодаря малым габаритным размерам, большим функциональным возможно-

Таблица 12.1. **Логические функции и их релейные эквиваленты**

Наименование функции	Содержание функции	Релейный эквивалент	Функциональная формула
И	Сигнал на выходе появляется при наличии сигналов на всех входах		$x=a_1\ a_2\ a_3$
ИЛИ	Сигнал на выходе появляется при наличии сигнала хотя бы на одном из входов		$x=a_1+a_2+a_3$
НЕ (отрицание)	При наличии сигнала на входе сигнал на выходе отсутствует, сигнал на выходе появляется при исчезновении сигнала на входе		$x=\bar{a}$

«Запрет»	При отсутствии сигнала на входе «запрет b» сигнал на выходе появляется одновременно с сигналом на входе a, при наличии сигнала на входе «запрет b» сигнал на выходе отсутствует		$x=a\bar{b}$
«Задержка»	Сигнал на выходе появляется через заданное время после подачи сигнала на вход и исчезает одновременно с входным сигналом		—
И — НЕ (элемент Шеффера)	Сигнал на выходе отсутствует при наличии сигналов на всех входах		$a=\overline{a_1a_2}=\bar{a}_1+\bar{a}_2$
Импликация	Сигнал выхода отсутствует, когда имеется сигнал на входе a и отсутствует на входе b		$x=\bar{a}+b$

Продолжение табл. 12.1

Наименование функции	Содержание функции	Релейный эквивалент	Функциональная формула
Эквивалентность (равнозначность)	Сигнал на выходе имеется тогда, когда на всех входах одновременно имеются или одновременно отсутствуют входные сигналы (состояние входов одинаково)		$x=ab+\bar{a}\bar{b}$
Неравнозначность («альтернатива»)	Сигнал на выходе имеется тогда, когда состояния входов a и b разные		$x=a\bar{b}+\bar{a}b$
Память	После подачи сигнала на вход a (включения) записанная информация сохраняется вплоть до подачи сигнала на вход b (отключения) независимо от последующего состояния входа a (X_1 — вспомогательный контакт реле X)		$x=(a+x_1)\bar{b}$

стям и высокой надежности в настоящее время преимущественно применяются полупроводниковые элементы.

Рассмотрим переход от схемы управления на контактных элементах к схеме на бесконтактных логических элементах. На рис. 12.33, *а* представлена схема включения взаимно блокированных контакторов *KM1* и *KM2*. При нажатии кнопки *SB1* контактор *KM1* включается при условии, что контактор *KM2* отключен. При нажатии кнопки *SQ2* происходит отключение контактора *KM1*. Включение

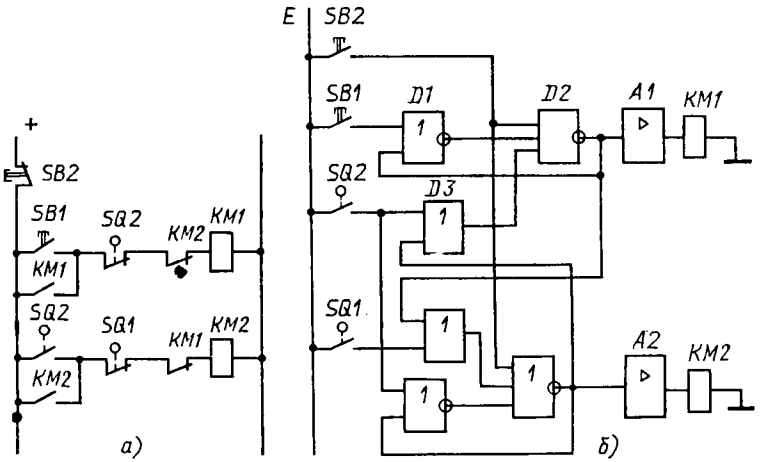


Рис. 12.33. Схема автоматической блокировки двух контакторов:
а — в контактном исполнении; *б* — реализованная на логических элементах

контактора *KM2* происходит аналогичным путем (при включении *SQ2*). Отключение обоих контакторов производится кнопкой *SB2*. Аналогичную функцию выполняет схема рис. 12.33, *б*, выполненная на бесконтактных логических элементах. При отключенной кнопке *SB1* на вход ИЛИ — НЕ *D1* подается логический нуль. На выходе его имеем логическую единицу. На выходе элемента ИЛИ—НЕ *D2* имеем логический нуль, который подается на усилитель *A1* и контактор *KM1*, который не включается. При включении *SB1* на выходе *D1* имеем нуль, на выходе *D2* — единицу. Контактор *KM1* включается. После отключения *SB1* логическая единица с выхода *D2* подается на вход *D1* и контактор *KM1* остается включенным. Если включается

контакт $SQ2$, то на выходе элемента $D3$ появляется логическая единица, которая подается на вход $D2$. При этом на выходе блока $D2$ появляется логический нуль и контактор $KM1$ отключается. Свойства схемы рис. 12.33, *а* полностью обеспечиваются схемой рис. 12.33, *б*.

Простейшие логические элементы на диодах приведены на рис. 12.34. При подаче отрицательного сигнала на любой из входов x_1—x_4 (рис. 12.34, *а*) на нагрузке $R_н$ появ-

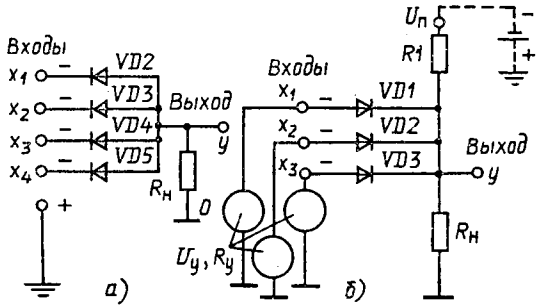


Рис. 12.34. Схемы логических элементов серий Т-106 и Т-107

ляется выходной сигнал и реализуется функция ИЛИ. В элементе И (рис. 12.34, *б*) при отсутствии входных сигналов диоды $VD1$ — $VD3$ открыты источником $U_п$. Внутреннее сопротивление $R_у$ источников сигналов управления $U_у$ близко к нулю. Таким образом, сопротивление нагрузки $R_н$ зашунтировано прямым сопротивлением диодов и сопротивлением $R_у$. Поскольку эти сопротивления малы, напряжение на выходе близко к нулю. При подаче сигналов на все три входа диоды $VD1$—$VD3$ запираются напряжением $U_у$ сигнала. На выходе появляется напряжение и выполняется функция И. Такие элементы работают без усиления и называются пассивными.

12.7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

На рис. 12.35 представлена схема элемента первой отечественной серии Т-101, выполняющего функцию ИЛИ — НЕ. В одном корпусе смонтированы два независимых элемента ИЛИ—НЕ.

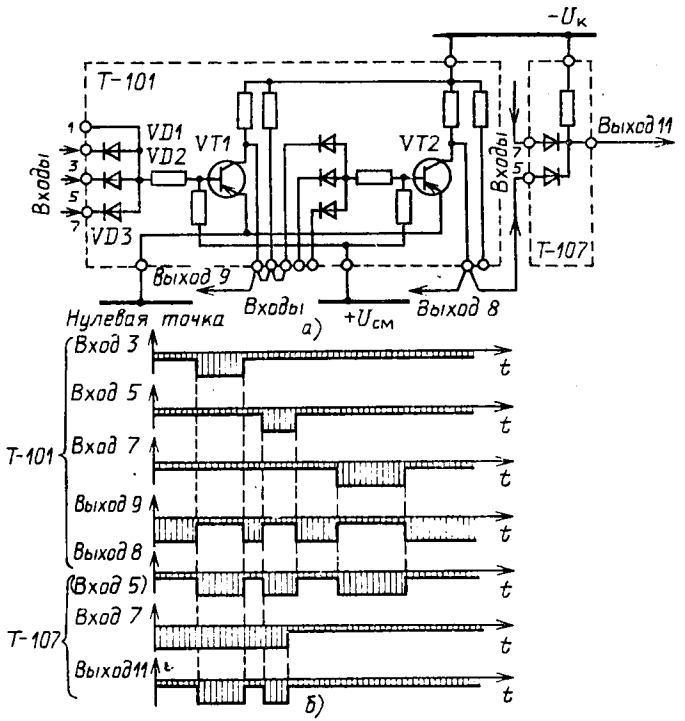


Рис. 12.35. Логический элемент серии Т-101, выполняющий функцию ИЛИ—НЕ (*а*), и его временные диаграммы (*б*)

Рассмотрим работу первого элемента. При отсутствии сигналов на входах *1*, *3*, *5*, *7* транзистор *VT1* закрыт напряжением смещения $+U_{см}$. При этом напряжение на его коллекторе (выход *9*) практически равно напряжению источника. На выходе элемента имеем логическую единицу, равную по значению напряжению источника — 12 В. При подаче на любой из входов *1*, *3*, *5*, *7* отрицательного напряжения от —4 до —12 В транзистор *VT1* открывается и напряжение на выходе *9* практически падает до $U_{эк}$ насыщения. На выходе появляется логический нуль. Элемент реализует логическую функцию $Y=\overline{X_1+X_2+X_3}$. Логический элемент серии Т-101 может питать элемент серии Т-107, выполняющий функцию И.

Более совершенная серия «Логика И» выполнена на интегральных микросхемах, имеет меньшие габариты и луч-

шие технические характеристики. Схема базового элемента для серии «Логика И» К-511 приведена на рис. 12.36, *а*. Вход выполнен на двух транзисторах *VT1* и *VT2* типа *p-n-p*. В качестве транзисторов *VT3*, *VT4*, *VT5* использованы транзисторные структуры типа *n-p-n* (§ 4.11). При открытых транзисторах *VT1* и *VT2* транзистор *VT3* закрыт, так как потенциал его базы равен нулю. Рассмотрим работу схемы при шунтированном стабилитроне *VD2*. Если закрыт транзистор *VT3*, то закрыт транзистор *VT5*. При этом транзистор *VT4* открыт и выходное напряжение $U_{вых}$ близко к на-

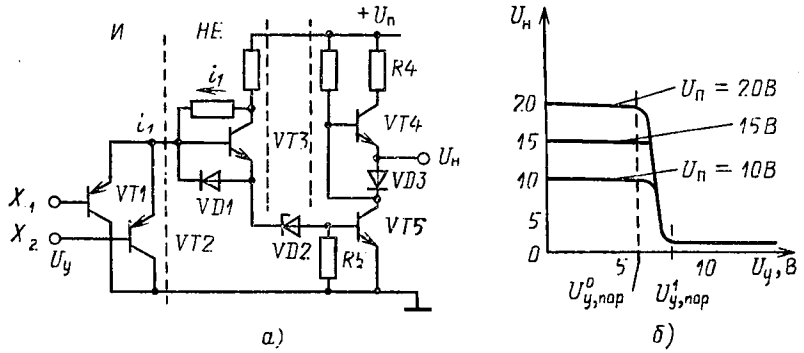


Рис. 12.36. Логический элемент серии К-511 (*а*) и его характеристика (*б*)

пряжению источника (+15 В). На выходе элемента выдается логическая единица. Если на оба входа X_1 и X_2 подать положительное напряжение, закрывающее оба транзистора *VT1* и *VT2*, то под действием тока i_1 открывается *VT3*. При этом *VT5* также открывается и напряжение на выходе падает до логического нуля. Транзистор *VT4* закрывается падением напряжения, образующимся на прямом сопротивлении диода *VD3*. Транзисторы *VT3* и *VT5* работают как один составной транзистор. Ток коллектора *VT3* является открывающим током для *VT5*, и оба транзистора либо открыты, либо закрыты. Для выравнивания их эмиттерных токов параллельно эмиттерному переходу транзистора *VT5* включается резистор *R5*. Этот же резистор обеспечивает закрытие *VT5*. Такое включение *VT3* и *VT5* позволяет повысить коэффициент усиления.

На рис. 12.36, *б* представлена зависимость выходного напряжения на нагрузке $U_н$ в зависимости от напряжения

Таблица 12.2

Группа элемента	Обозначение элемента	Основное функциональное назначение	Количество схем в элементе	Габариты	Масса, кг
Логические	И-1010000	НЕ	7	1	0,052
	И-1020000	4И	2	1	0,048
	И-1030000	2И — НЕ	4	1	0,049
	И-1040000	4И—НЕ	2	1	0,017
	И-1050000	4ИЛИ	2	1	0,055
	И-1060000	3И — 3ИЛИ	1	1	0,052
	И-1070000	2И — НЕ; НЕ	2; 2	1	0,049
	И-1080000	2ИЛИ — НЕ	4	1	0,051
	И-1090000	4И — 2ИЛИ — НЕ	1	1	0,046
	И-1100000	RS-триггер	—	1	0,053
	И-1110000	Счетный JK-триггер	—	1	0,048
	И-1120000	2И — НЕ; НЕ	2; 2	1	0,049
	И-1140000	Двоично-десятичный счетчик	—	1	0,045
	И-1150000	Реверсивный четырехразрядный двоичный счетчик	—	2	0,084
	И-1160000	Высоковольтный дешифратор преобразования двоично-десятичного кода в десятичный	—	1	0,049
	И-1170000	Логический дешифратор	—	2	0,077
	И-1180000	Шифратор	—	2	0,074
	И-1190000	Цифровой нуль-орган для поразрядного сравнения двоичных кодов	—	2	0,080
Функциональные	И-2010000	Входной согласующий элемент между аппаратами управления и элементами серии «Логика И»	4	2	0,062
	И-2020000	То же $U_{пит}=48$ В	2	2	0,047
	И-2030000	То же $U_{пит}=60$ В	2	2	0,049
	И-2040000	То же $U_{пит}=110$ В	2	2	0,053
	И-2050000	Аналоговый компаратор напряжения	—	—	0,074
	И-2060000	Входной согласующий элемент между аппаратами управления и элементами серии «Логика И», $U_{пит}=110$ В	1	2	0,057

Продолжение табл. 12.2

Группа элемента	Обозначение элемента	Основное функциональное назначение	Количество схем в элементе	Габариты	Масса, кг
Времени	И-3010000	Элемент выдержки времени	1	2	0,073
Выходное	И-4010000	Выходной связующий элемент между элементами серии «Логика И» и аппаратами управления	4	2	0,062
	И-4020000	Выходной усилитель (24 В; 7,5 Вт)	2	2	0,069
	И-4030000	Выходной усилитель (220 В; 30 Вт)	2	2	0,134
	И-4050000	Усилитель (15 В; 1,5 Вт)	6	1	0,050
	И-4060000	Выходной усилитель (~110, 220 В; I=1 А)	2	2	0,128

управления $U_{\text{у}}$ и напряжения питания $U_{\text{п}}$. Скачкообразное изменение напряжения на выходе имеет место при пороговом напряжении управления $U^{0}_{\text{у,пор}} \div U^{1}_{\text{у,пор}} = 5 \div 7$ В.

Следует отметить, что к выходу элемента может быть подключено много других логических элементов, которые создают эквивалентную емкость на выходе (до 680 пФ). Заряд этой емкости происходит через небольшой резистор *R4* и транзистор *VT4*, а разряд — через *VD3* и *VT5*. Благодаря малой постоянной времени заряда и разряда время срабатывания элемента мало: 250—500 нс.

Для повышения помехоустойчивости элемента включен стабилитрон *VD2*. До тех пор, пока напряжение на нем менее 6 В, транзисторы *VT3* и *VT5* не открываются.

Для увеличения числа управляющих сигналов параллельно транзисторам *VT1* и *VT2* могут включаться дополнительные транзисторы типа *p-n-p*.

Основные параметры элемента К-511

Напряжение питания, В	15±10 %
Логическая единица, В, не менее	12
Логический нуль, В, не менее	1,5
Пороговое значение логического нуля, В	6
Статическая помехоустойчивость по постоянному току, В	4,5
Частота переключений, кГц, не менее	10

В зависимости от функционального назначения элементы серии «Логика И» делятся на логические, функциональные, времени и выходные усилители (табл. 12.2).

Элемент логики И-101 содержит семь независимых инверторов, осуществляющих функцию НЕ. Функциональная схема показана на рис. 12.37, *а*. Входами схемы являются контакты *2, 5, 7, 8, 10, 12, 15*, выходами — контакты *3, 4, 6, 9, 11, 13, 14*. Питание подается на контакты *1* (+15 В)

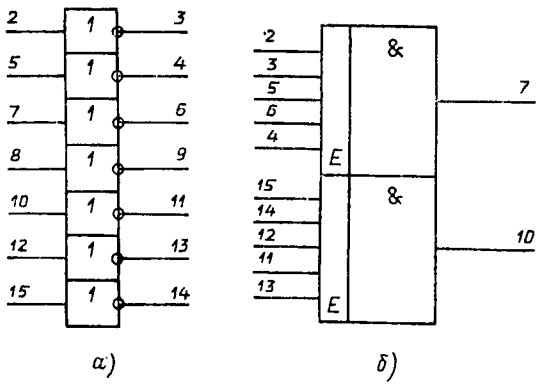


Рис. 12.37. Функциональная схема:
а — элемента И-101; *б* — элемента И-102

и *16* (—15 В), не обозначенные на рисунке. На рис. 12.37, *б* показана функциональная схема элемента И-102. Элемент состоит из двух независимых схем, каждая из которых реализует функцию 4И. Аналогично представляются логические элементы И-103—И-109 и И-112. Более подробные сведения о логических элементах серии «Логика И» приведены в [12.5].

12.8. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К логическим элементам относятся триггеры, являющиеся элементами памяти. В триггере на основе электромагнитного реле (рис. 12.38) при нажатии кнопки x_1 подается напряжение на его обмотку *Y*. Реле кроме главного контакта имеет вспомогательный контакт *y*, который при замыкании кнопки x_1 шунтирует ее после срабатывания. Поэтому после размыкания кнопки x_1 токи в нагрузке и об-

мотке реле остаются. Нагрузка обесточивается при нажатии кнопки x_2. Таким образом, в схеме реализуется функция памяти.

Логическая функция триггера может быть записана в виде $Y=(x_1+y)\bar{x}_2$. Преимущественное распространение получили полупроводниковые триггеры типов *RS*, *JK*, *T* и *D*. В *RS*-триггере используются логические элементы ИЛИ—НЕ и И—НЕ (рис. 12.39) и имеются вход *S* (английский термин set — установка) и вход *R* (английский термин reset — сброс). Выход *Q* триггера называют прямым, выход $\bar{Q}$ — инверсным. По обоим выходам элементы триггера *D1* и *D2* охвачены перекрестными обратными связями.

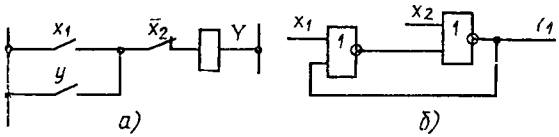


Рис. 12.38. Триггеры:

а — на основе электромагнитного реле; *б* — на полупроводниковых элементах ИЛИ — НЕ

Рассмотрим работу схемы рис. 12.39, *а*. Пусть на входах *R* и *S* сигналы отсутствуют. При этом на выходе *Q* могут устанавливаться логические 0 или 1. Допустим, $Q=0$. Если подать сигнал на вход *S*, то на выходе *B* устанавливается 0. На входе *R* при этом сигнала нет, и на выходе элемента *D1* устанавливается 1, так как на второй вход элемента *D1* нулевой сигнал подается с выхода *D2*. Если со входа *S* сигнал снять, то на выходе элемента *D2* сигнал отсутствует (0) из-за наличия сигнала обратной связи от элемента *D1*. Если подать сигнал на вход вторично, то состояние триггера не изменится. На выходе *A* устанавливается 1, на выходе *B*—0. Если подать сигнал на вход *R*, то на выходе *A* устанавливается нулевой сигнал, при этом на вход элемента *D2* подается два логических нуля и на выходе элемента *D2* устанавливается 1. При снятии сигнала со входа *R* состояние элемента *A* не изменится ($Q=0$), так как на него действует сигнал обратной связи с элемента *D2*. Одновременная подача сигналов на входы *S* и *R* приводит к неопределенному состоянию триггера. Такая возможность должна быть в схеме исключена.

Если до подачи сигнала на вход *S* на выходе элемента

D1 сигнал $Q=1$, то это автоматически определяет сигнал на выходе *B*, равный нулю ($Q=0$). При подаче сигнала на вход *S* состояние триггера не меняется.

RS-триггер на элементах И—НЕ показан на рис. 12.39, *б*. Подадим сигнал 0 на вход $\bar{S}$ и сигнал 1 на вход $\bar{R}$. Так как на элементе *D1* один из входов имеет 0, то на его выходе устанавливается 1 вне зависимости от сигнала на втором входе. По цепи обратной связи эта 1 будет подана на второй вход элемента *D2*. Поскольку на входе *D2* имеем две логические 1, то на его выходе устанавливается 0. При сигналах $\bar{R}=0$, $S=1$ и наличии $Q=1$ и $\bar{Q}=0$ на выходе элемента *D2* устанавливается 1, так как один из его входов имеет 0 ($\bar{R}=0$). По цепи обратной связи эта 1 передается на элемент *D1*, и на его выходе появляется 0, так как на вход подано две логические единицы. Происходит сброс триггера. При $\bar{R}=\bar{S}=1$ триггер сохраняет предыдущее состояние.

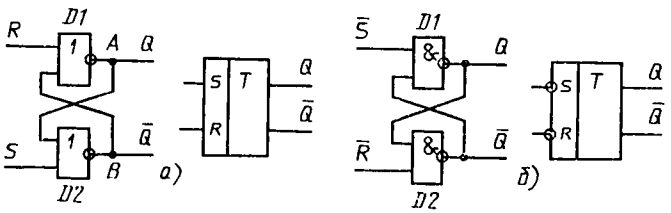
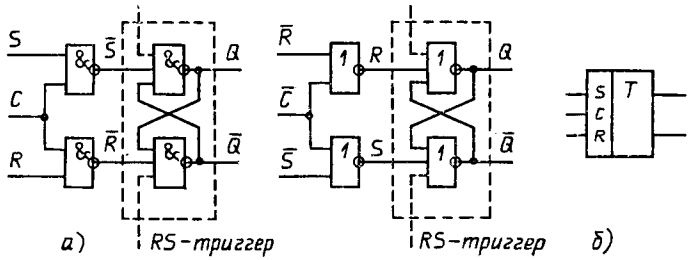


Рис. 12.39. Асинхронные *RS*-триггеры:
а — с прямыми входами; *б* — с инверсными входами

Триггер на элементах И—НЕ является инверсным относительно триггера на элементах ИЛИ—НЕ (см. рис. 12.39, *а*), так как он переходит в состояние $Q=1$ и $\bar{Q}=0$ при подаче сигнала $\bar{S}=0$ и $\bar{R}=1$. Значения $\bar{R}=0$, $\bar{S}=0$ должны быть исключены, так как такое их сочетание приводит к неопределенному состоянию триггера.

Описанные триггеры называются асинхронными, так так они могут изменять свое состояние немедленно после появления входных сигналов. При этом возможно нарушение логических связей, обусловленное тем, что выходные сигналы обратной связи различных элементов из-за переходных процессов образуются не одновременно. Из-за этого появляются ложные сигналы, нарушающие нормаль-



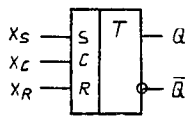
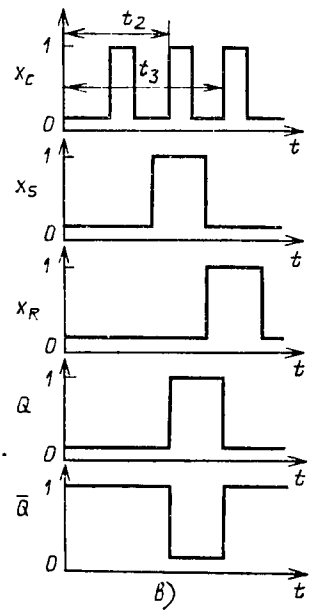


Рис. 12.40. Синхронизированный *RS*-триггер:

а — на элементах И — НЕ; *б* — на элементах ИЛИ — НЕ; *в* — временна́я диаграмма



ную работу схем управления. Для устранения этого недостатка вводится синхронизирующий вход C, который запускает триггер (рис. 12.40). На входах RS-триггера, содержащего элементы И—НЕ (рис. 12.39, *а*), стоят два элемента И—НЕ. На вход $\bar{R}$ сигнал подается только тогда, когда одновременно подаются сигналы X_S и X_C (рис. 12.40, *а* и *в*). Диаграмма работы синхронизированного RS-триггера показана на рис. 12.40, *в*. Сигнал на выходе $Q = 1$ устанавливается только тогда, когда в момент времени t_2 появляются $X_S = 1$ и $X_C = 1$. Обратное состояние триггера появляется в момент времени t_3 при наличии сигналов $X_R = 1$ и $X_C = 1$. Обычно синхронизированные триггеры имеют дополнительные входы, показанные штриховой линией, для установки в исходное положение.

В JK-триггере (рис. 12.41, *а*) на входе RS-триггера, выполненного на элементах И—НЕ, стоят дополнительно два элемента И—НЕ с тремя входами. Через вход C осуществляется синхронизация. По принципу действия JK-триггер

аналогичен RS-триггеру, но может переключаться при подаче 1 на оба входа J и K. Допустим, что состояние выходов $Q=1$ и $\overline{Q}=0$. Подадим сигналы $J=1$ и $K=0$. На входах $\overline{S}$ и $\overline{R}$ имеем 1. Триггер не меняет своего состояния. Если $Q=0$ и $\overline{Q}=1$, то на входе $\overline{S}$ получается 0, а на входе $\overline{R}$ устанавливается 1. Происходит переброс триггера в состояние $Q=1$ и $\overline{Q}=0$. Если затем подать сигналы $J=0$ и $K=1$, то триггер переходит в состояние $Q=0$ и $\overline{Q}=1$. На входы J и K можно одновременно подать логические 1. Если $Q=1$ и $Q=0$, то на входе $\overline{S}$ устанавливается 1 и на входе $\overline{R}$—0. Происходит переброс триггера в состояние $Q=0$ и $\overline{Q}=1$. Если снова подать 1 на оба входа, то триггер переходит в состояние $Q=1$ и $\overline{Q}=0$. Таким образом JK-

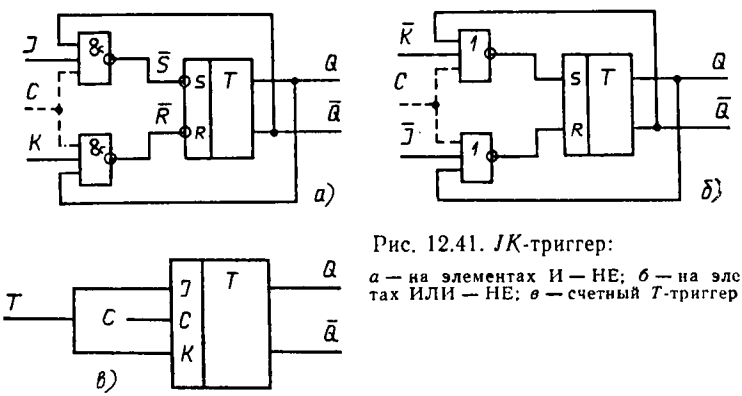


Рис. 12.41. JK-триггер:

а — на элементах И — НЕ; *б* — на элементах ИЛИ — НЕ; *в* — счетный T-триггер

триггер может работать при одновременной подаче сигнала 1 на оба входа. Триггеры RS при одновременной подаче единичного сигнала на оба входа имеют неопределенное состояние.

Если входы J и K объединить, то получается счетный T-триггер (рис. 12.41, *в*). При каждой подаче одного сигнала на вход происходит инвертирование сигналов на выходах.

Схема и временна́я диаграмма синхронизированного D-триггера даны на рис. 12.42. Триггер имеет вход D и синхронизирующий вход T. При отсутствии сигнала на входе D $Q=0$ и $\overline{Q}=1$. Если сигнал на вход D приходит в момент

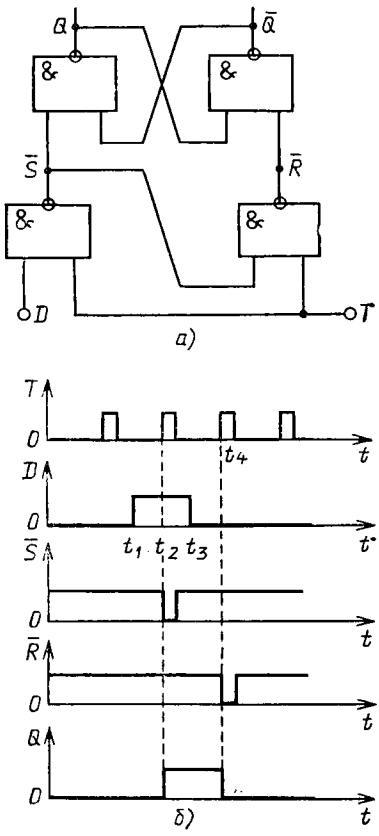


Рис. 12.42. Схема и временна́я диаграмма D-триггера

времени t_1, состояние триггера не меняется. В момент t_2 прихода синхроимпульса на вход T происходит переброс триггера в положение $Q=1$, $\bar{Q}=0$. После прохождения синхроимпульса и снятия сигнала D состояние триггера не меняется, пока не придет следующий синхроимпульс (до момента времени t_4). Таким образом, D-триггер сохраняет состояние логической 1 после снятия входного сигнала до прихода очередного синхроимпульса.

Для записи двоичных чисел служат регистры. Регистр состоит из двоичных ячеек, число которых соответствует числу разрядов — длине кода. На рис. 12.43 показана схема четырехразрядного асинхронного параллельного регистра, выполненного на RS-триггерах. Каждому разряду кода соответствует один триггер. В параллельном регистре информация во все разряды вводится одновременно.

Регистр имеет три общие шины: шины установки нуля *ШО*, шину записи *ШЗ*, шину считывания *ШС*. При подаче напряжения на шину *ШО* все триггеры устанавливаются на нуль (происходит очистка памяти). При подаче напряжения на шину *ШЗ* срабатывают элементы И ($B1$—$B4$) и сигнал подается на входы RS-триггеров. Для считывания информации из регистра подается сигнал на шину *ШС*. На выходе регистров включены четыре элемента И (C_1—C_4), выдающие сигнал Y после подачи напряжения на шину *ШС*. При считывании состояние регистров не меняется. За-

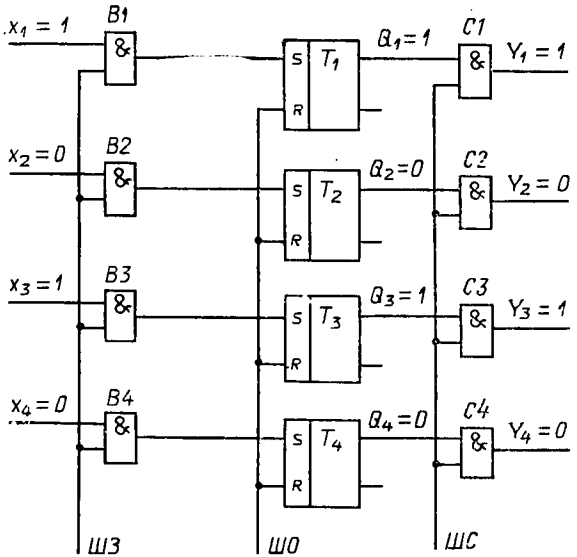


Рис. 12.43. Асинхронный параллельный регистр

писанная информация может использоваться многократно. Цифровая информация может записываться в регистрах последовательного действия. Сначала записывается старший разряд, а потом младшие.

Дешифратор — это логическая схема, которая каждую комбинацию сигналов на его входе (код) в результате обработки информации выдает в виде определенного сигнала на его выходе. Такая операция широко используется при автоматическом управлении. Дешифраторы также используются при переходе из одной системы счисления в другую. На рис. 12.44 представлена схема дешифратора для перевода двоично-десятичной системы в десятичную. В табл. 12.3 показан процесс перевода. Дешифраторы реализуются на триггерных узлах и имеются в серии «Логика И».

Для электрической развязки выходов логических элементов от присоединяемого оборудования и повышения выходной мощности широко применяются выходные элементы в виде герконовых реле (И-201—И-204, И-206, И-401—И-403). Однако герконы обладают таким недостатком, как возможность вибрации контактов. Если вибрации контактов недопустимы, то применяется выходной элемент И-406

Таблица 12.

Число входных импульсов	Состояния триггеров счетчика				Состояние выходов дешифратора									
	T_4 d	T_3 c	T_2 b	T_1 a	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

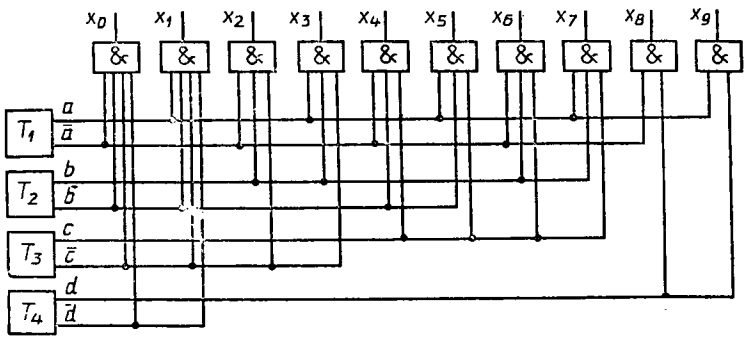


Рис. 12.44. Структурная схема дешифратора

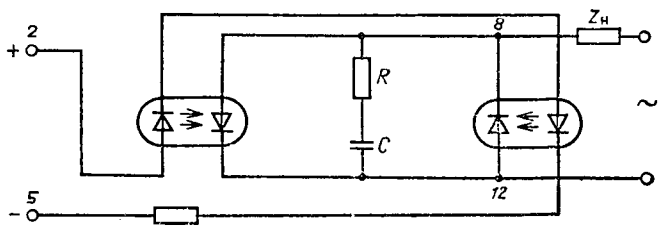


Рис. 12.45. Оптоэлектронный выходной элемент серии «Логика И»

на оптоэлектронных приборах (рис. 12.45). При подаче сигнала на контакты *2*, *5* подается напряжение на фотодиоды, излучение которых открывает фототиристоры. В результате сопротивление между точками *8*, *12* резко падает и через нагрузку потечет ток. Наличие в схеме двух тиристоров обеспечивает прохождение через нагрузку переменного тока. Цепочка *RC* служит для ограничения перенапряжений на тиристорах.

12.9. БЕСКОНТАКТНЫЕ КОММУТИРУЮЩИЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (БКРПУ)

а) **Общие сведения.** На основе тиристоров возможно осуществление следующих операций:

1) включение и отключение электрической цепи с активной и смешанной (индуктивной и емкостной) нагрузкой;

2) изменение тока нагрузки за счет регулирования момента подачи сигнала управления.

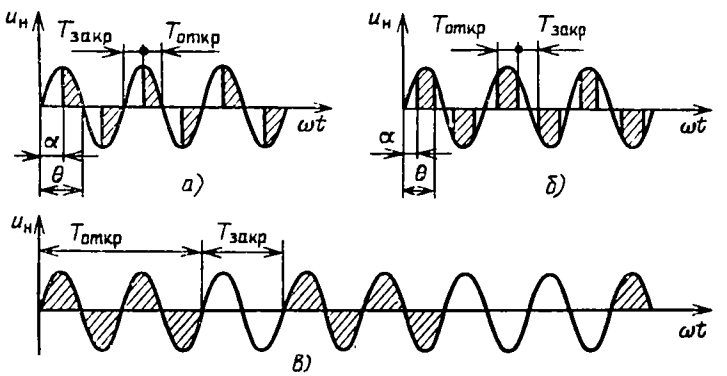


Рис. 12.46. Напряжение на нагрузке при фазовом (*а*), фазовом с принудительной коммутацией (*б*) и широтно-импульсном (*в*) управлении

Наиболее широкое применение в бесконтактных электрических аппаратах получили фазовое и широтно-импульсное управление (рис. 12.46).

В первом случае среднее и действующее значения тока меняются за счет изменения момента подачи на тиристор открывающего сигнала — за счет угла α. Угол α называ-

ется углом управления. Действующее напряжение на нагрузке при двухполупериодной схеме и встречно-параллельном включении двух тиристоров (рис. 12.47)

$$U_{\text{н}} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2} =$$

$$= \frac{U_{\text{с}}}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2} = U_{\text{с}}\sqrt{\gamma};$$

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha + \sin 2\alpha/2}{\pi};$$

$$U_{\text{н}} = U_{\text{н0}}(1 + \cos\alpha)/2,$$

где U_m — амплитуда напряжения питания; $U_{\text{с}}$, $U_{\text{н0}}$ — действующее и среднее значения напряжения питания; γ — угол регулирования.

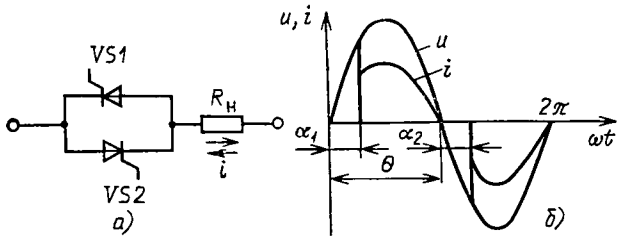


Рис. 12.47. Встречно-параллельное включение тиристоров (*а*) и форма тока при активной нагрузке (*б*)

Кривая тока в сети и в нагрузке несинусоидальна, что вызывает искажение формы напряжения сети и нарушения в работе потребителей, чувствительных к высокочастотным помехам. Для уменьшения этих искажений необходимы специальные меры.

При широтно-импульсном управлении (рис. 12.46, *в*) в течение времени $T_{\text{откр}}$ на тиристоры подан открывающий сигнал, они открыты и к нагрузке приложено напряжение $U_{\text{н}}$. В течение времени $T_{\text{закр}}$ управляющий сигнал снят и тиристоры закрыты. Действующее значение тока в нагрузке

$$I = I_{\text{н.м}}\frac{T_{\text{откр}}}{T_{\text{откр}} + T_{\text{закр}}},$$

где $I_{\text{н.м}}$ — ток нагрузки при $T_{\text{закр}} = 0$.

Регулирование тока нагрузки возможно за счет измене-

ия как угла α, так и угла θ. Принудительная коммутация ($\theta < 180°$) осуществляется с помощью специальных узлов (§ 4.11) или специальных тиристоров, которые могут запираться подачей сигнала управления. При больших токах из-за сложности такие схемы не применяются. Создание транзисторов на большие токи (сотни ампер) и большие напряжения (сотни вольт) позволяет упростить принудительную коммутацию цепей постоянного и переменного тока, что особенно важно в аппаратах повышенного быстродействия.

На основе тиристоров работают следующие бесконтактные электрические аппараты:

1) тиристорные пускатели для прямого пуска асинхронных двигателей (§ 8.5);

2) тиристорные пускатели для плавного пуска, реверса и останова асинхронных двигателей большой мощности (до 5000 кВт);

3) регуляторы мощности и напряжения;

4) автоматические выключатели переменного тока высокого и низкого напряжения повышенного быстродействия;

5) регулирующие аппараты для управления двигателями электрического транспорта переменного тока с рекуперацией энергии при торможении.

Для тиристорных аппаратов, как правило, необходима защита от токов перегрузки и КЗ, а также от недопустимого повышения температуры корпусов тиристоров. Защита от КЗ в данном случае осуществляется с помощью быстродействующих токоограничивающих предохранителей или автоматических выключателей.

Ниже приводятся основные технические данные тиристорных пускателей и регуляторов, выпускаемых отечественной промышленностью.

Пускатели тиристорные серии ПТ. В фазах *A* и *B* пускателя (рис. 12.48) установлены трансформаторы тока *TA1* и *TA2*, обеспечивающие работу устройства токовой защиты. Защита тиристоров от перегрузки осуществляется терморезистором R_t. Поскольку пускатель предназначен для реверса двигателя, то в фазах *A* и *B* установлены дополнительные комплекты встречно включенных тиристоров. При нажатии кнопки «Пуск вперед» включается реле *K1*, которое подает напряжение на управляющие электроды тиристоров, участвующих в пуске «Вперед». При нажатии кнопки «Пуск назад» включается реле *K2* и подается напряжение на управляющие электроды тиристоров, участвующих в пуске «Назад». Питание блока защиты и реле *K1* и *K2* осуществляется выпрямителем, питающимся от фаз *B* и *C*.

Основные параметры пускателя: $U_{ном}=380$ В; $I_{ном}=40$ А; $I_{пуск}=$

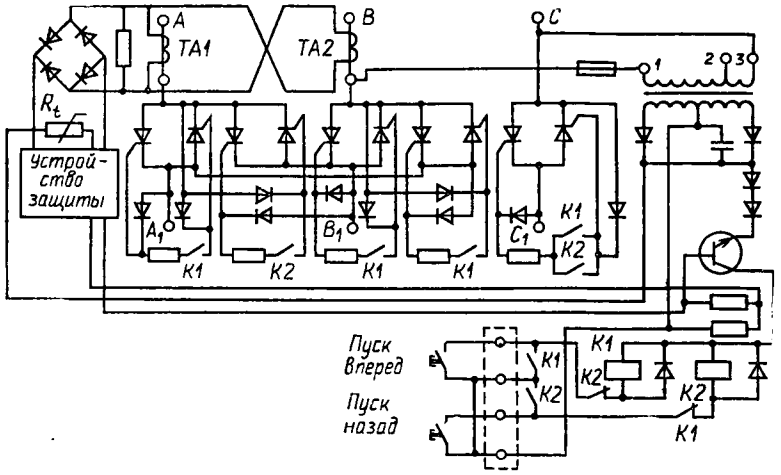


Рис. 12.48. Тиристорный пускатель типа ПТ

$=360$ А при $t_{пуск}=0{,}4$ с; электрическая износостойкость 10^7 циклов; ресурс работы не менее 10 000 ч.

б) **Тиристорные станции управления типа БЛЭ.** Эти комплектные аппараты служат для управления асинхронными электродвигателями мощностью до 7,5 кВт. Упрощенная схема станции приведена на рис. 12.49. Плавный разгон двигателя обеспечивается изменением угла открытия тиристоров *VS1*, *VS3* и *VS4*, благодаря чему подаваемое напряжение меняется от нуля до номинального в течение 1—3 с. В каждой фазе включены диоды *VD1*, *VD3*, *VD4*, включенные встречно-параллельно тиристорам *VS1*, *VS3*, *VS4*. Тиристоры шунтированы цепочкой *RC* для ограничения перенапряжений, возникающих при их коммутациях.

Длительность разгона двигателя определяется задатчиком интенсивности включения *1*, с помощью которого регулируется момент выдачи управляющего тиристорами сигнала. Задатчик интенсивности включения, блок генератора импульсов *2* питаются от выпрямителя, состоящего из трансформатора *T* и двух выпрямительных мостов.

При включении реле *K1* управляющие электроды тиристоров подключаются к блоку генератора импульсов, а в задатчике интенсивности начинается выработка запускающего импульса, который подается в блок генератора пилообразного напряжения.

Станция позволяет регулировать частоту вращения двигателя от внешнего сигнала управления. Для этого к выводам *9* и *10* необходимо подключить регулируемый источник постоянного напряжения. Измене-

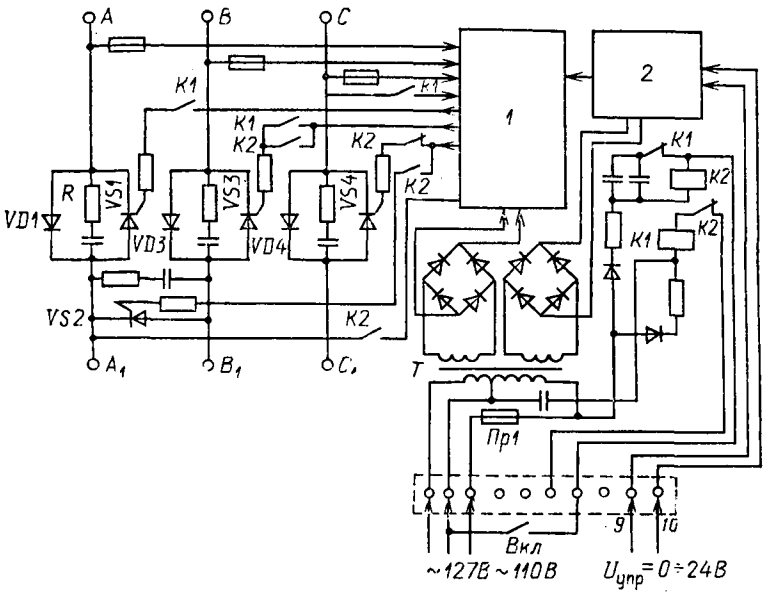


Рис. 12.49. Упрощенная электрическая схема тиристорной станции управления типа БЛЭ5301

ние этого напряжения меняет угол открытия тиристоров и выходное напряжение станции, поступающее на обмотку статора двигателя.

При отключении двигателя обесточивается реле *K1* и включается реле *K2*, которое подключает тиристоры *VS2* и *VS3*. В результате создается контур для торможения двигателя. Плавность торможения определяется задатчиком интенсивности, который изменяет угол открытия тиристоров *VS2* и *VS3*. При напряжении сети 380—500 В станция обеспечивает плавный пуск и отключение двигателей с торможением. Электрическая износостойкость составляет $15 \cdot 10^6$ циклов при числе включений до 1200 в час.

в) **Тиристорные станции управления серии ПТУ.** Станции предназначены для управления асинхронными двигателями большой мощности.

В зависимости от модификации станции серии ПТУ могут обеспечивать прямой пуск и реверс двигателей, динамическое торможение и реверс, пуск с фазовым управлением, динамическим торможением и реверсом. Схема станции с динамическим торможением приведена на рис. 12.50. Станции имеют следующие виды защит: максимально-токовую с временем срабатывания не более 0,015 с; от перегрузки по току с временем отключения не более 20 с при токе, равном 1,35 тока уставки; от

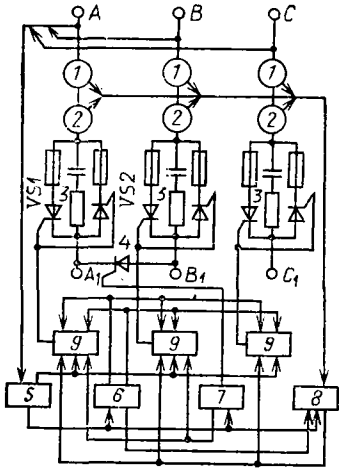


Рис. 12.50. Схема тиристорной станции управления типа ПТУ с динамическим торможением:

1 — трансформатор тока максимальной защиты; *2* — трансформатор тока перегрузки; *3* — силовой тиристорный блок; *4* — тиристор в цепи динамического торможения; *5* — блок питания; *6* — блок включения; *7* — блок управления динамическим торможением; *8* — блок защиты; *9* — блок формирования управляющих импульсов

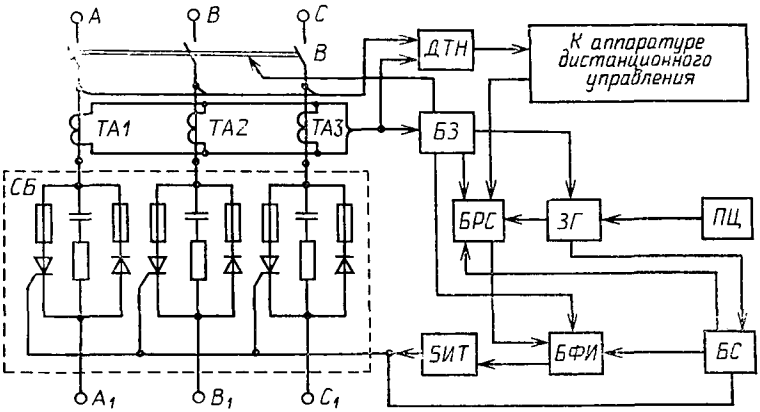


Рис. 12.51. Схема регулятора мощности типа РМТ

понижения напряжения до 0,7—0,45 номинального; от исчезновения тока в одной из фаз. Станции выпускаются на $I_{ном}$=400 А, номинальное напряжение до 440 В, число включений 2400 в час. Электрическая износостойкость составляет $24 \cdot 10^6$ циклов.

г) **Тиристорный регулятор мощности.** Регулятор мощности типа РМТ (рис. 12.51) предназначен для широтно-импульсного регулирования трехфазных электропечей мощностью до 630 кВ·А с напряжением сети

30 В. Силовой блок *СБ* имеет по два встречно-включенных тиристора диода в каждой фазе. Блоки защиты *БЗ* и датчика тока и напряжения *ДТН*, служащие для обеспечения автоматического регулирования, питаются от трансформаторов тока *ТА1—ТА3*. Управляющие импульсы для тиристоров вырабатываются блоками синхронизации *БС*, блоком формирования импульсов *БФИ* и выходным усилителем *БИТ*. Управление блоком *БФИ* производится с помощью блоков переключателя циклов *ПЦ*, задающего генератора *ЗГ* и блока регулирования и синхронизации *БРС*. Продолжительность цикла регулирования устанавливается переключателем циклов *ПЦ*, который воздействует на задающий генератор *ЗГ*. Один выход блока *ЗГ* управляет блоком *БРС*, который служит для регулирования коэффициента $T_{откр}/(T_{откр}+T_{закр})$ при работе РМТ и для ограничения пусковых токов при включении активно-индуктивной нагрузки.

Второй выход блока *ЗГ* воздействует на блок синхронизации *БС* и обеспечивает подачу управляющего сигнала в начале положительной полуволны тока, протекающего через тиристор. В блоке защиты *БЗ* осуществляется защита регулятора в аварийном режиме.

В заключение следует отметить, что в настоящее время выпускается целый ряд полупроводниковых аппаратов специального назначения — регуляторы напряжения типа РНТТ мощностью 200 кВ·А, тиристорные прерыватели типа ПТО для коммутации секций первичных обмоток сварочных трансформаторов, тиристорные регуляторы типа ВИП для питания двигателей электроподвижного состава от сети переменного тока и т. п. Подробные данные об этих аппаратах приведены в [12.7].

12.10. МИКРОПРОЦЕССОРЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ МАШИНЫ

В настоящее время для улучшения технических характеристик, повышения надежности и сокращения времени монтажа аппараты автоматического управления и регулирования электрического привода выполняются в виде комплектных станций управления (КСУ) [2.3]. Эти станции проектируются по типовым схемам и собираются на заводе-изготовителе с применением наиболее высокопроизводительного оборудования, что ведет к сокращению материалоемкости и трудоемкости, позволяет быстро внедрять новейшие достижения науки и техники. КСУ создаются на базе либо традиционных электромагнитных аппаратов (автоматов, пускателей, контакторов, реле [2.3]), либо дискретных полупроводниковых элементов (§ 12.9), либо совместного использования и тех и других изделий. Для КСУ характерна фиксированная последовательность всех функ-

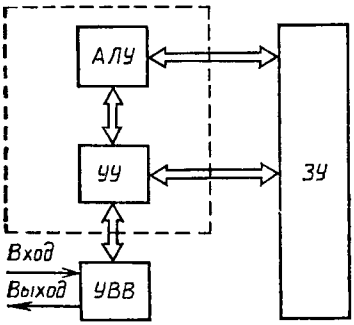


Рис. 12.52. Функциональная схема ЭВМ

циональных операций. Любое изменение поставленной ранее функциональной задачи требует перемонтажа принципиальной схемы КСУ и последующей наладки, что связано с затратами дополнительного труда и времени. Поэтому создаваемые в настоящее время системы программного управления металлорежущими станками, роботами, технологическими процессами требуют наличия легко изменяемой программы управления.

Развитие полупроводниковой техники привело к созданию больших интегральных микросхем (БИС) с очень высокой степенью интеграции. БИС на одном кристалле имеют несколько десятков тысяч элементов и способны реализовать сложнейшие функции управления. Применение БИС в комплектных устройствах автоматического управления создает исключительно широкие возможности в гибком изменении их программ, уменьшении габаритов, повышении надежности и долговечности. На основе БИС создаются микропроцессоры.

Рассмотрим основные узлы ЭВМ (рис. 12.52). На вход ЭВМ могут подаваться результаты отдельных измерений, электрические сигналы управления, числа для расчетов по известным формулам и др. Эти данные обрабатываются ЭВМ, и на ее выходе появляются результаты статистической обработки экспериментальных материалов, сигналы для управления силовыми электрическими аппаратами, результаты расчетов и т. п. В простейшем виде ЭВМ состоит из следующих основных узлов: арифметико-логического устройства *АЛУ*, управляющего устройства *УУ*, запоминающего устройства *ЗУ* и периферийных устройств *УВВ*. *АЛУ* предназначено для выполнения арифметических операций сложения, вычитания, умножения и деления чисел, а также для осуществления логических операций И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ—НЕ, И—НЕ и др.

Управляющее устройство осуществляет управление работой всех остальных узлов, а также потоками информации внутри ЭВМ. Действия *УУ* определяются командами

овокупность команд, которые должны быть выполнены для ешения поставленной задачи, называется программой.

Запоминающее устройство *ЗУ*, или память машины, лужит для хранения программ и обрабатываемой инфорации. *ЗУ* состоит из ячеек, каждая из которых содержит лементы памяти. В ЭВМ для расчетов и управления приеняется двоичная система исчисления, основанием которой является цифра 2. Любое число в этой системе предтавляется так называемым словом, состоящим из логичесих нулей (0) и единиц (1). Элементы памяти выполняются а полупроводниковых триггерах, а ячейка — на регитрах, содержащих эти триггеры. Триггер хранит одну двоичную цифру — 1 или 0. Чтобы ввести число в ячейку или звлечь ее содержимое, необходимо указать адрес этой ячейки.

Память делится на оперативную (ОЗУ) и постоянную (ПЗУ). С помощью ОЗУ в *АЛУ* и *УУ* вводятся внешние анные. В ПЗУ хранится программа операций.

Периферийные устройства представляют собой устройства ввода и вывода информации *УВВ*. В них осуществляется считывание данных с перфокарты, магнитной ленты и других носителей и превращение этих данных в форму, требуемую для машины. В УВВ осуществляется также фиксация результатов работы ЭВМ в виде чисел текста на телетайпе или в виде информации на экране электронно-лучевой трубки (дисплее).

Совокупность *АЛУ* и *УУ* является единым комплексом, который позволяет производить автоматическую обработку информации в соответствии с заданной программой. Эта совокупность называется центральным процессором машины или просто процессором.

Микропроцессор — это процессор, выполненный в виде одной или нескольких БИС. Приставка «микро» обозначает высокую степень интеграции устройства, его малые габариты и массу. На вход микропроцессора через *УВВ* и *ЗУ* подаются управляющие сигналы и сигналы обратной связи в двоичном коде. По программе, заложенной в *ЗУ*, информация обрабатывается в *АЛУ* и на выходе появляются сигналы, используемые для управления объектом.

Различают микропроцессоры универсальные и специализированные. Универсальный микропроцессор выполняет функции центрального процессора и широко используется

в микроЭВМ, системах автоматического управления, измерительных приборах, диагностических устройствах и др.

Специализированный микропроцессор предназначен для решения конкретной задачи и оптимизирован по определенному параметру. Он решает эту задачу во много раз быстрее, чем универсальный.

Микропроцессорный комплект — это совокупность микропроцессорных и других интегральных схем, которые совместимы и могут быть объединены по своим конструктивно-технологическим данным. Обычно в комплект входят БИС микропроцессора, запоминающее устройство, устройство ввода-вывода информации и др.

Микроконтроллер, или просто контроллер, — это микропроцессорный комплект, конструктивно оформленный в виде платы. По своему назначению он аналогичен контактному командоконтроллеру (см. рис. 7.6), в котором в зависимости от регулировки кулачков происходит коммутация выходных контактов при определенном положении вала. Программа контроллера может меняться путем перестановки кулачков.

Различают микроконтроллеры с жесткой и изменяемой программой. Микроконтроллер с изменяемой программой обрабатывает входные сигналы по программе, заложенной в ПЗУ, и выдает выходной сигнал. При изменении программы в ПЗУ происходит изменение выполняемой задачи.

Микропроцессорная система заключает в себе БИС микропроцессорного комплекта, использующую микропроцессор как обрабатывающий узел системы управления приводом, измерения и других целей. Если в системе используется несколько микропроцессоров, то система называется мультимикропроцессорной.

МикроЭВМ является конструктивно законченным устройством, содержащим микропроцессор, источник питания, запоминающее устройство, узлы ввода-вывода информации и пульт управления.

Рассмотрим структурную схему простейшего устройства управления электроприводом с помощью микропроцессора (рис. 12.53). Двигатель *М* питается от тиристорного преобразователя *ТП*, который управляется от микропроцессора *МП*. Звено *БС* — блок согласования (интерфейс) *МП* и *ТП*.

Изменение скорости двигателя во время пуска контролируется с помощью датчика тока *ДТ* и датчика частоты вращения *ДЧВ*. В качестве *ДТ* используется дроссельный магнитный усилитель (§ 6.1), в качестве *ДЧВ* — тахогенератор.

Аналоговые выходные сигналы *ДТ* и *ДЧВ* с помощью аналого-цифровых преобразователей *АЦП* превращаются в цифровые данные, которые подаются в *МП*.

Внешние органы управления (кнопки, датчики) воздействуют через УВВ и ЗУ на *МП*, который обеспечивает разгон двигателя по требуемому закону. В случае необходимости закон пуска двигателя может быть изменен путем замены программы в ПЗУ микропроцессора.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом релестроения (ВНИИР) разработано универсальное устройство управления с программируемой логикой (УЛП) [12.9].

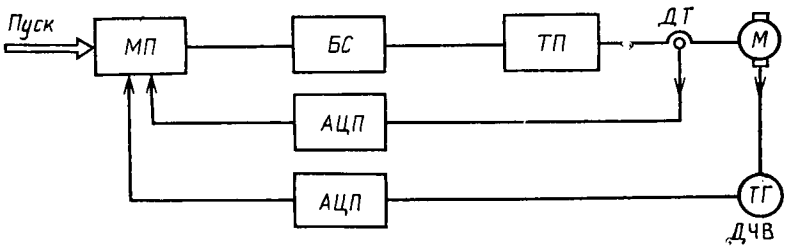


Рис. 12.53. Функциональная схема управления двигателем постоянного тока с помощью микропроцессора

Это устройство предназначено для замены существующего релейного оборудования систем управления с разветвленной логикой. УЛП состоит из следующих функциональных узлов: блока входов, блока управления, блока выходов, блока питания, пульта записи, пульта контроля.

Блок входов предназначен для сопряжения входных сигналов с уровнем логических сигналов блока управления, гальванической развязки между ними и выбора опрашиваемого входа.

Блок управления служит для логической обработки входных и получения выходных сигналов, опроса входных каналов и посылки информации в выходные каналы по программе, записанной в постоянной памяти.

Блок выходов служит для усиления мощности выходных логических сигналов до уровня, необходимого для срабатывания исполнительных устройств, гальванической развязки между логическими и силовыми сигналами, выбора адресуемого выхода и хранения состояния выходов в периоды между обращениями к ним.

Блок питания преобразует трехфазное переменное напряжение сети в постоянное напряжение, необходимое для питания всех блоков.

Принцип действия УЛП заключается в следующем. Блок управления производит опрос блока входов и обрабатывает полученные данные в соответствии с программой, заложенной в его запоминающем устройстве. Полученные данные посылаются в выходное устройство, которое воздействует на исполнительные аппараты. По существу УЛП является электронной управляющей машиной. Изменение программы УЛП производится путем замены кассеты в блоке управления. Конструктивно блоки управления, входа, выхода выполнены в виде унифицированных легкосъемных кассет. Наибольшее число входов и выходов УЛП составляет 1024. Блок выходов имеет герконовые или оптоэлектронные развязки. Длина команды 1 и 2 байт (8 или 16 разрядов в слове). Длина информационного слова 4 бита. Количество команд 42. Объем постоянной памяти 8192 байта. Время опроса 1 К памяти 5 мс. Объем оперативной памяти 4 Кбит.

В [12.9] приведены конкретные примеры перехода с релейно-контактной схемы управления на УЛП. УЛП позволяет решать уравнения логики и может применяться для контроля технологических процессов.

Применение микропроцессоров и управляющих вычислительных машин в схемах автоматического управления является прогрессивным по всем показателям, и следует ожидать самого широкого применения их в электрических аппаратах.

Глава тринадцатая

ДАТЧИКИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

13.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Датчики представляют собой электрические аппараты, предназначенные для преобразования непрерывного изменения входной (контролируемой) неэлектрической величины в изменение выходной электрической величины. Входные величины могут отражать самые разнообразные физические явления — линейное или угловое перемещение, скорость, ускорение, температуру твердых, жидких и газообразных

тел, усилие, давление и т. д. В качестве выходных величин чаще всего используются активное, индуктивное, емкостное сопротивление, ток, ЭДС, падение напряжения, частота и фаза переменного тока.

Основной характеристикой датчика является чувствительность

$$S = \Delta Y/\Delta X,$$

где ΔY, ΔX — приращения выходной и входной величин.

Часто пользуются понятием относительной чувствительности

$$S_0 = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X},$$

где Y, X — полные изменения выходной и входной величин.

Датчики могут быть линейными (S=const) и нелинейными (S=var). У последних чувствительность зависит от входной величины. Важным параметром датчика является порог чувствительности, представляющий собой наименьшее значение входной величины, вызывающее изменение выходной величины, которое может быть измерено.

Номинальной характеристикой датчика называется зависимость выходной величины от входной. Эта характеристика дается в паспорте датчика и используется как расчетная при измерениях. Экспериментально снятая зависимость вход-выход отличается от номинальной на погрешность.

Различают абсолютную и относительную погрешности датчика по входу.

Абсолютная погрешность

$$\Delta X = X_{\text{вх,ном}} - X_{\text{д}},$$

относительная погрешность

$$\gamma_0 = \Delta X/X_{\text{д}},$$

где $X_{\text{вх,ном}}$ — значение входной величины датчика, определяемое по выходной величине и номинальной характеристике; $X_{\text{д}}$ — действительное значение входной величины.

Введем номинальный коэффициент преобразования $K_{\text{ном}} = X_{\text{вх,ном}}/X_{\text{вых}}$, тогда $X_{\text{вых}} = X_{\text{вх,ном}}/K_{\text{ном}}$.

Аналогично могут быть рассмотрены погрешности датчика по выходу.

На погрешность оказывают влияние внешние условия эксплуатации: температура, магнитные и электрические поля, влажность окружающей среды, напряжение и частота

источника питания, механические и радиационные воздействия и др. Допустимая интенсивность внешних воздействий оговаривается в технических условиях на поставку датчика.

Погрешности датчика при нормальных значениях внешних параметров (нормальной температуре, нормальном атмосферном давлении, номинальных значениях напряжения и частоты питания и т. п.) называются основными.

Различают аддитивную погрешность, не зависящую от значения входной величины X, и мультипликативную погрешность, зависящую от нее (погрешность чувствительности).

Абсолютная и относительная погрешности выражаются формулами

$$\Delta X = \pm (\Delta_0 + \gamma_s X);$$
$$\gamma_0 = \Delta X / X = \pm [\Delta_0 / X + \gamma_s],$$

где Δ_0 — аддитивная погрешность; γ_s — относительная погрешность чувствительности.

На рис. 13.1 показана зависимость относительной погрешности γ_0 от входной величины X. Здесь $X_н$ — нижнее значение, $X_в$ — верхнее значение входных величин, при которых нормируется основная погрешность.

Если параметры внешних условий выходят за границы нормируемых, то возникают дополнительные погрешности. Для уменьшения дополнительных погрешностей либо снижают чувствительность датчика к внешним условиям, либо уменьшают степень их влияния.

Наряду с высокой чувствительностью и малой погрешностью датчики должны обладать необходимым диапазоном изменения входной величины, возможностью согласования с измерительной схемой и минимальным обратным воздействием датчика на входную величину. При быстрых изменениях входной величины датчик должен быть малоинерционным.

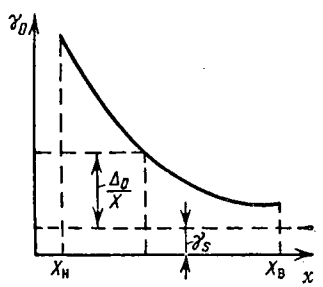


Рис. 13.1. Зависимость относительной погрешности от входной величины X

Существующие датчики весьма разнообразны по принципу действия, конструктивному выполнению и схеме.

Датчики можно разбить на две большие группы — парамет-

рические (пассивные) и генераторные (активные). К первым относятся резистивные, индуктивные, емкостные и контактные датчики. Ко вторым относятся датчики, использующие эффект наведенной ЭДС (электромагнитной индукции), пьезоэффект, эффект Холла, термо-ЭДС, появление ЭДС при воздействии радиоактивных излучений и т. п. Здесь будут рассмотрены датчики, которые по принципу действия и конструкции близки к электрическим аппаратам. Так же как и электрические аппараты, датчики могут быть подразделены на контактные и бесконтактные.

Подробные сведения по датчикам различных типов даны в [13.1—13.3].

13.2. КОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ

а) **Резистивные датчики.** В таких датчиках подвижный скользящий контакт *1* переменного резистора связан с элементом, перемещение которого контролируется (рис. 13.2, *а, б*).

Если сечение каркаса *2*, на котором намотан резистор, всюду одинаково, то сопротивление датчика меняется пропорционально углу поворота α или ходу x. При необходимости зависимость $R(\alpha, x)$ может быть сделана нелиней-

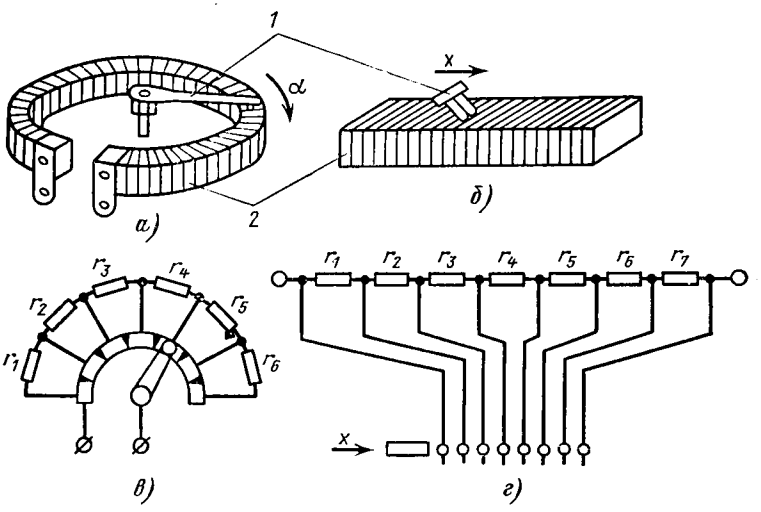


Рис. 13.2. Различные исполнения резистивных датчиков

ной. Тогда каркас имеет переменное сечение или резисторы r_1—r_6 неодинаковы по сопротивлению (рис. 13.2, *в* и *г*).

Возможные схемы включения датчиков приведены на рис. 13.3. Наиболее простой является реостатная схема рис. 13.3, *а*. Широко применяется потенциометрическая схема рис. 13.3, *б*. Если входное сопротивление измерительной схемы велико, то выходное напряжение $U_{вых}$ зависит от α или x и не зависит от R_0:

$$U_{вых} = \frac{U_0}{\alpha_{max}}\alpha \text{ или } U_{вых} = \frac{U_0}{x_{max}}x. \qquad (13.1)$$

Чувствительность датчика с линейным перемещением подвижного контакта

$$S = \frac{dU_{вых}}{dx} = \frac{U_0}{x_{max}}. \qquad (13.2)$$

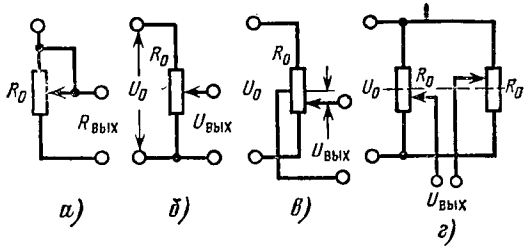


Рис. 13.3. Схемы включения резистивных датчиков

Для повышения чувствительности желательно увеличивать напряжение питания U_0. Однако при этом растет мощность, рассеиваемая датчиком. Максимальная чувствительность

$$S_{max} = \frac{\sqrt{P_{max}R_0}}{x_{max}},$$

где P_{max} — наибольшая допустимая мощность резистора R_0.

В схеме рис. 13.3, *в* при перемещении подвижного контакта вниз или вверх от начального среднего положения ($\alpha=0$) выходное напряжение меняет полярность. В схеме рис. 13.3, *г* при перемещении левого подвижного контакта вниз правый с помощью механической передачи движется вверх. При этом чувствительность возрастает в 2 раза. Чув-

:твительность резйстивных датчиков может быть 3—5 В/мм.

Погрешность работы датчиков зависит от стабильности питающего напряжения U_0, точности изготовления конструктивных деталей, температурной стабильности использованного проводникового материала. Для повышения температурной стабильности следует применять проволоку с малым температурным коэффициентом сопротивления.

В качестве примера применения резистивного датчика рассмотрим устройство для регистрации скорости контактов силовых коммутационных аппаратов, например высоко-

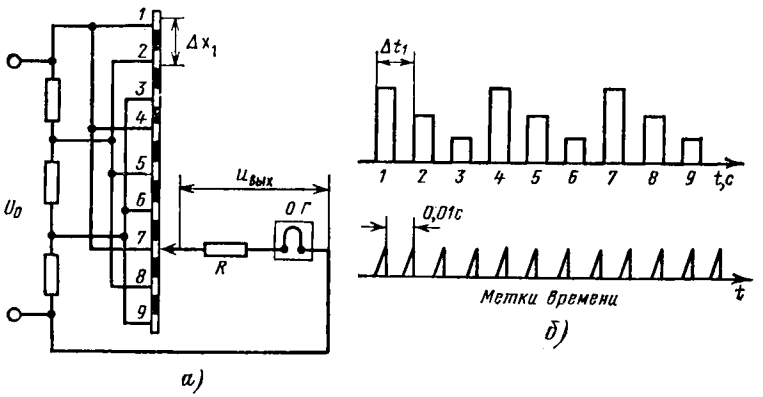


Рис. 13.4. Резистивный датчик хода контактов высоковольтных выключателей

вольтных выключателей. С подвижным контактом выключателя жестко связывается подвижный контакт датчика (рис. 13.4, *а*). Выходное напряжение датчика подается через добавочный резистор R на осциллографический гальванометр *ОГ*.

Зная ширину неподвижного контакта датчика, ширину изоляционной пластины и масштаб времени, можно найти время Δt_1, которое требуется для прохождения участка Δx_1. Осциллограмма процесса представлена на рис. 13.4, *б*. Скорость подвижного контакта на первом участке хода $v_1 = \Delta x_1 / \Delta t_1$. Аналогично находится скорость на других участках хода.

Достоинством такого датчика является независимость его точности от питающего напряжения U_0.

Резистивные датчики применяются для измерения линейных и угловых перемещений. С их помощью можно измерить уровень и расход жидкости (датчик соединяется с поплавком), силу (датчик соединяется с упругим элементом, деформируемым измеряемой силой), размеры и т. д.

Преимущества резистивных датчиков заключаются в простоте конструкции, точности работы до 0,5 %, малых массе и габаритах.

Недостатком является наличие подвижного контакта, ухудшающего надежность работы и уменьшающего срок службы.

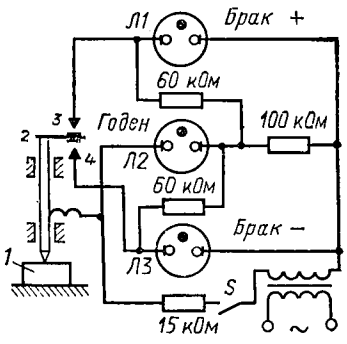


Рис. 13.5. Контактный датчик

б) **Контактные релейные датчики.** Для контроля размеров и отбраковки негодных деталей широко применяются контактные релейные датчики (рис. 13.5).

Если толщина детали *1* находится в поле допуска, то горит лампа *Л2*. Если толщина детали *1* больше нормы, то замыкаются контакты *2*, *3*, загорается лампа *Л1* и гаснет лампа *Л2*. Если толщина детали меньше нормы, то замыкаются контакты *2*, *4*, загорается лампа *Л3* и гаснет лампа *Л2*.

Погрешность и надежность работы датчика зависят от работы контактной системы. Работа контактов подробно рассмотрена в гл. 3. Напряжение на контактах и ток через них не должны превышать значений, приведенных в табл. 3.3. Дугообразование должно быть исключено. Для уменьшения износа контактов целесообразно применять схемные методы § 3.2.

Следует отметить, что при малом расстоянии между контактами (1 мкм) даже при напряжении 10 В создается высокий градиент поля $E = 10^7$ В/м, что может привести к интенсивной эрозии контактов. Мощность, коммутируемая контактами, не должна превышать 100—150 мВт.

Минимальная погрешность при срабатывании контактного датчика находится в пределах 1—2 мкм.

13.3. БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ

а) **Индуктивные датчики.** Рассмотрим простейший индуктивный датчик (рис. 13.6, 13.7). Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, потоками рассеяния и выпучивания, то согласно § 5.3 индуктивность обмотки

$$L = w^2 \Lambda_\delta = w^2 \frac{\mu_0 S}{2\delta}.$$

Ток в цепи обмотки

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_н + R)^2 + (\omega L)^2}}.$$

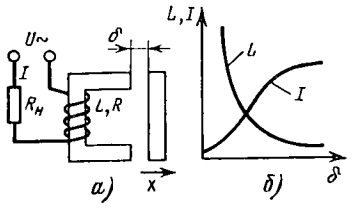


Рис. 13.6. Индуктивный датчик с изменяющимся зазором

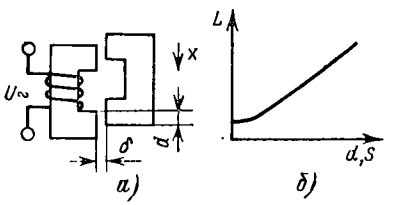


Рис. 13.7. Индуктивный датчик с изменяющейся площадью зазора

Индуктивность обмотки L и протекающий по ней ток I могут изменяться за счет изменения зазора δ или его площади S. На рис. 13.6, *а* представлен датчик с изменяемым зазором δ, а на рис. 13.7, *а* — с изменяемой площадью S зазора, пропорциональной координате перемещения d. Зависимость индуктивности и тока от зазора дана на рис. 13.6, *б*, а зависимость индуктивности от площади или координаты d — на рис. 13.7, *б*.

Погрешности индуктивных датчиков определяются стабильностью напряжения и частоты источника питания, влиянием температуры на активное сопротивление обмотки и размеры рабочего зазора.

Согласно § 5.3 чувствительность индуктивного датчика при изменении зазора

$$S_\delta = -\frac{\Delta L}{\Delta\delta} = \frac{L_0}{\delta_0 [1 + \Delta\delta/\delta_0]^2};$$

при изменении площади

$$S_s = \frac{\Delta L}{\Delta S} = \frac{L_0}{S_0},$$

где L_0 — начальное значение индуктивности датчика при

$\delta = \delta_0$ и $S = S_0$; δ_0, S_0 — длина зазора и его площадь в начале хода; $\Delta\delta$ и ΔS — изменение зазора и площади.

Таким образом, чувствительность S_δ является нелинейной функцией $\Delta\delta$. Для работы с малой нелинейностью целесообразно выбирать $\Delta\delta/\delta_0 \leqslant 0{,}2$.

На якорь описанных выше датчиков действует сила, создающая механическую нагрузку на элемент, перемещение которого контролируется. Эта сила (§ 5.6)

$$P = P_m \sin^2 \omega t = 2\frac{B_m^2}{\mu_0} S \sin^2 \omega t.$$

Для устранения этого недостатка применяются дифференциальные датчики. Дифференциальный датчик содержит две совершенно одинаковые и симметрично расположенные электромагнитные системы (рис. 13.8, *а*).

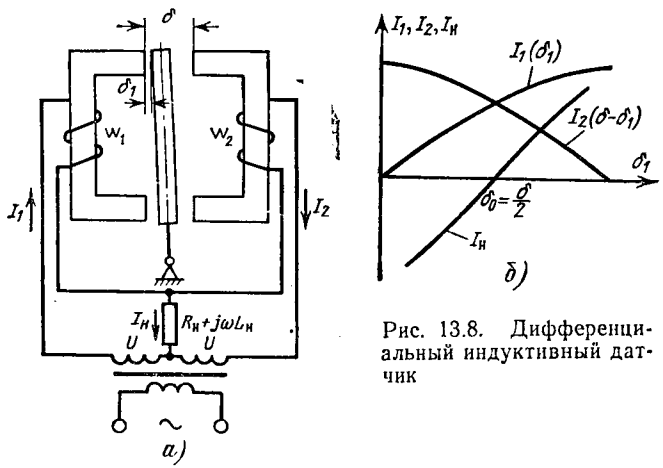


Рис. 13.8. Дифференциальный индуктивный датчик

Токи в обмотках w_1, w_2 соответственно равны

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_н + R)^2 + \omega^2 \left(L_н + k\frac{S}{\delta_1}\right)^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(R_н + R)^2 + \omega^2 \left(L_н + k\frac{S}{\delta - \delta_1}\right)^2}},$$

где k — конструктивный фактор, R — активное сопротивление обмотки.

Ток в нагрузке

$$\underline{I}_{\text{н}} = \underline{I}_1 - \underline{I}_2.$$

При увеличении зазора δ_1 ток I_1 в обмотке w_1 увеличивается, а ток I_2 в обмотке w_2 уменьшается, так как зазор $\delta_2 = \delta - \delta_1$ тоже уменьшается.

Зависимость тока в нагрузке от зазора показана на рис. 13.8, *б*. По сравнению с рис. 13.6, *б* возрастает крутизна этой зависимости, и она становится более линейной. Если пренебречь активным сопротивлением цепи, то согласно § 5.6 сила, действующая на якорь, не зависит от зазора и поток, проходящий через зазор δ_1, равен потоку в зазоре $\delta - \delta_1$. В результате сила, действующая на якорь, примерно равна нулю. Таким образом, в дифференциальном датчике отсутствуют механические воздействия на контролируемый элемент.

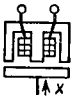
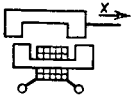
Потери в стали магнитопроводов и изменения активного сопротивления обмоток при воздействии температуры не оказывают существенного влияния на погрешность измерений, так как взаимно компенсируются в параллельных плечах дифференциальной схемы. Применение дифференциальных датчиков обеспечивает расширение пределов измерений и повышение чувствительности. Некоторые конструктивные исполнения индуктивных датчиков показаны в табл. 13.1.

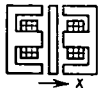
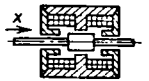
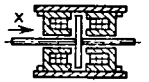
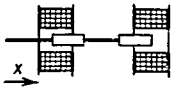
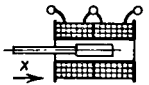
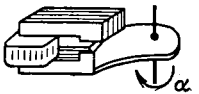
Если в воздушный зазор вводить профилированный ферромагнитный диск (поз. 10), то контролируемый угол достигает 360° и может быть получена зависимость $L = f(\alpha)$ практически любого вида. Если в зазор вводится диск из немагнитного электропроводящего материала, то это аналогично появлению в магнитной системе короткозамкнутого витка. Как показано в § 5.3, введение короткозамкнутого витка (диска) создает реактивное магнитное сопротивление $X_{m\text{к}}$. Тогда индуктивность

$$L = \frac{w^2}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Lambda_\delta}\right)^2 + (X_{m\text{к}})^2}}, \text{ где } X_{m\text{к}} = \frac{\omega}{r_{\text{диска}}}.$$

Магнитное сопротивление $X_{m\text{к}}$ зависит от формы диска, его электрической проводимости и положения в рабочем зазоре. С целью повышения чувствительности такой датчик может быть включен в колебательный контур с частотой 10—15 кГц. Для уменьшения потерь катушки датчика вы-

Таблица 13.1. **Конструктивные исполнения индуктивных датчиков**

Тип системы	Схема	Входное перемещение, мм	Примечание
1. Датчик с изменяющейся длиной зазора		0,01—5	—
2. Датчик с Ш-образным сердечником		0,01—5	—
3. Датчик с изменяющейся площадью зазора		0,5—15	—
4. Дифференциальный датчик с П-образной магнитной системой		0,01—5	—

Тип системы	Схема	Входное перемещение, мм	Примечание
5. Дифференциальный датчик с Ш-образной магнитной системой		0,01—5	—
6. Дифференциальный датчик с цилиндрической магнитной системой		0,1—15	Для увеличения чувствительности используется наружный магнитопровод в виде стального цилиндра
7. То же		0,01—5	То же
8. Соленоидный датчик		3—100	» »
9. То же		3—50	» »
10. Датчик с профилированным диском		$\alpha=0\div360°$	Возможно получение любого вида зависимости $L=f(\alpha)$

полняются в виде двух плоских обмоток без магнитопрово да, между которыми перемещается диск.

При изменении положения диска изменяется частота ко лебательного контура, включенного в цепь сетки электрон ной лампы, и в определенном положении возникают услови самовозбуждения генератора. Контролирующий прибо включен в анодную цепь [13.1]. При работе в такой схем датчик имеет очень высокую чувствительность. Большим достоинством датчика с немагнитным диском является ма лое механическое воздействие датчика на контролируемы элемент.

б) **Трансформаторные датчики.** В трансформаторном датчике (рис. 13.9, *а*) при изменении зазора δ полное сопротивление первичной обмотки $Z_1 \approx \omega L_1 = \omega \mu_0 w_1^2 \frac{S}{2\delta}$ также меняется и происходит перераспределение напряжений $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$.

Выходное напряжение можно найти из уравнений

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \quad \underline{U}_1 = \underline{U} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2};$$

$$\underline{U}_{\text{вых}} = \frac{w_2}{w_1} \underline{U}_1 = k\underline{U}_1.$$

Зависимость $U_{\text{вых}}$ (δ) представлена на рис. 13.9, *д*.

В более совершенном дифференциальном трансформаторном датчике (рис. 13.9, *б*) выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ можно найти приближенно с помощью уравнений

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{L_1}{L_3} = \frac{w_1^2 \Lambda_1}{w_2^2 \Lambda_2} = \frac{w_1^2 \delta_2}{w_2^2 \delta_1}$$

$$\Lambda_1 = \frac{\mu_0 S}{2\delta_1}; \quad \Lambda_2 = \frac{\mu_0 S}{2\delta_2};$$

$$\underline{U}_{\text{вых}} = \frac{w_2}{w_1} (\underline{U}_1 - \underline{U}_2) \approx k\underline{U} \frac{\Lambda_1 - \Lambda_2}{\Lambda_1 + \Lambda_2} = k\underline{U} \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2}.$$

Таким образом, выходное напряжение прямо пропорционально разности зазоров $\delta_2 - \delta_1$. При больших перемещениях применяются датчики с изменяемой площадью зазора (рис. 13.9, *в*).

При угловых перемещениях контролируемого элемента используются датчики с поворотной рамкой (рис. 13.9, *г*). Выходное напряжение в таком датчике пропорционально синусу угла поворота якоря α:

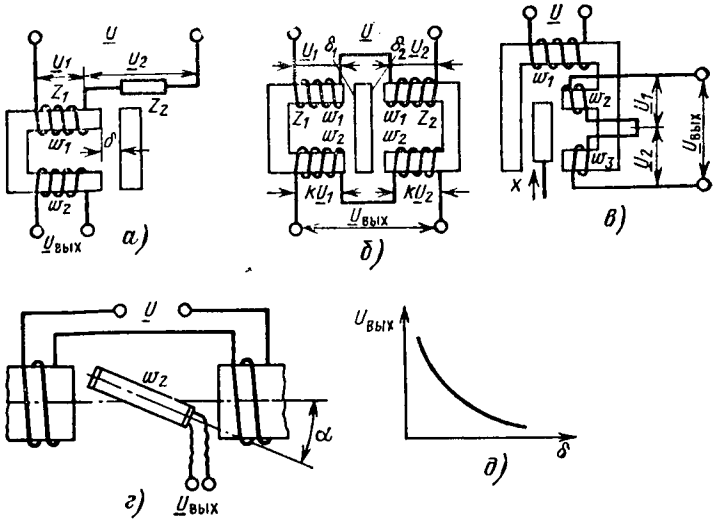


Рис. 13.9. Трансформаторные датчики:

а — трансформаторный датчик с одним магнитопроводом; *б* — дифференциальный трансформаторный датчик; *в* — трансформаторный датчик с изменяемой площадью зазоров; *г* — датчик с поворотной рамкой

$$U_{вых} = \omega w_р \Phi_р \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\alpha, = \omega w_р B S_р \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\alpha,$$

где $w_р$ — число витков рамки; B — максимальное значение индукции в рабочем зазоре, Тл; $S_р$ — площадь рамки, м^2; α — угол поворота.

Трансформаторные датчики выгодно отличаются от индуктивных отсутствием гальванической связи между цепью питания и выходной цепью, а также простотой измерительных схем. Относительно большая мощность датчиков (до нескольких десятков ватт) позволяет применять их без промежуточных усилителей. Они также широко применяются с мостовыми измерительными схемами [13.3]. За счет применения дифференциальных схем включения погрешности, вызванные изменением питающего напряжения, частоты, несинусоидальностью формы тока, изменением окружающей температуры, могут быть снижены до 0,5—0,1 %.

Индуктивные и трансформаторные датчики нашли широкое применение для измерения перемещений, деформаций, контроля размеров и т. п.

в) **Магнитоупругие датчики.** Если на ферромагнитны материал воздействует механическое усилие, то меняетс его магнитная проницаемость μ_a. Это явление, называемо магнитоупругим эффектом, используется в датчиках дл измерения статических, знакопеременных и быстро изменя ющихся механических нагрузок. В магнитоупругих датчи ках на рис. 13.10, *а* и *б* при изменении силы P изменяетс магнитная проницаемость μ_a материала магнитопровод и, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки В датчиках на рис. 13.10, *в* и *г* за счет изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность обмо

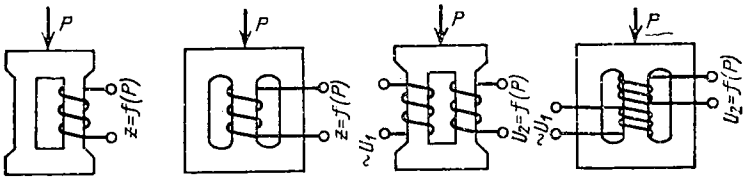


Рис. 13.10. Магнитоупругие датчики больших усилий

ток и, следовательно, выходное напряжение U_2. Относительная чувствительность датчика

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta\mu_a/\mu_a}{\Delta l/l} \geqslant 100,$$

где $\Delta l/l$ — относительное удлинение (сжатие) магнитопровода под воздействием силы P.

В пределах упругой деформации $\Delta l/l = \sigma/E$, где σ — механическое напряжение в ферромагнитном материале; E — модуль упругости.

Изменение проницаемости $\Delta\mu_a/\mu_a$ можно выразить через конструктивные параметры [13.2]:

$$\Delta\mu_a/\mu_a = 2\Delta l/l\big|_{B=B_s}\mu_a\left(\sigma/B_s^2\right),$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; B_s — индукция насыщения материала, Тл; $\Delta l/l$ — относительная деформация при $B=B_s$. Тогда

$$S_{\text{отн}} = 2E\,\frac{\Delta l}{l}\bigg|_{B=B_s}\mu_a/B_s^2.$$

Для увеличения чувствительности желательно, чтобы материалы имели высокую проницаемость μ_a и малую ин-

дукцию насыщения. Поэтому для таких датчиков широко применяется пермаллой. С целью увеличения чувствительности магнитопровод датчика выполняется без зазоров. В некоторых исполнениях датчика тонкая пластина пермаллоя с обмоткой приклеивается к детали так же, как тензодатчик [13.2].

Погрешности датчика вызываются колебаниями питающего напряжения (изменяются начальное значение μ_a и магнитоупругий эффект), температуры (изменяются сопротивления обмотки и магнитоупругий эффект) и магнитоупругим гистерезисом.

Для снижения погрешности от колебаний напряжения устройства с магнитоупругим датчиком должны питаться от стабилизированных источников питания. Для компенсации температурной погрешности в одно плечо моста включается датчик, подвергающийся воздействию контролируемой силы, в другое — компенсационный, имеющий точно такие же параметры, но не подвергающийся воздействию. При изменении внешней температуры одинаково изменяются активные сопротивления датчиков. Поскольку эти датчики включены в схему моста, изменение их активного сопротивления не сказывается на работе всего измерительного канала.

Погрешности за счет магнитоупругого гистерезиса могут достигать 4 % и вызваны тем, что одному и тому же значению воздействующей силы соответствует различное значение магнитной проницаемости. Для уменьшения этой погрешности выбирается материал с узкой петлей гистерезиса. Напряженность магнитного поля должна приближаться к напряженности насыщения. Максимальная механическая нагрузка не должна превышать $^1/_6$—$^1/_7$ предела упругости.

г) **Индукционные датчики.** Если изменяется потокосцепление, связанное с проводником или катушкой, то в них возникает ЭДС. Это происходит при движении проводника в магнитном поле или магнитного поля, пересекающего неподвижный проводник. ЭДС индукции возникает и тогда, когда потокосцепление изменяется в результате изменения магнитной проводимости. Эти явления лежат в основе работы индукционных датчиков.

Индукционные датчики часто используются как датчики скорости. Если использовать дифференцирующие и интегрирующие цепочки, то можно получить выходные величины, пропорциональные ускорению и перемещению.

Простейший индукционный датчик скорости линейного

перемещения показан на рис. 13.11. Выходной сигнал снимается с обмотки, в которой наводится ЭДС $E=Blwv$, где B — индукция, создаваемая в рабочем зазоре кольцевым постоянным магнитом; Тл; l — длина витка перемещающейся измерительной обмотки, м; w — число витков; v — скорость перемещения измерительной обмотки, м/с. Чувствительность датчика $S=Blw$ может быть увеличена за счет увеличения индукции и числа витков. Для получения сигнала, пропорционального перемещению, сигнал с обмотки интегрируется с помощью цепочки RC. При интегрировании с малой погрешностью постоянная времени $T=RC$ берется достаточно большой и сигнал уменьшается в сотни раз.

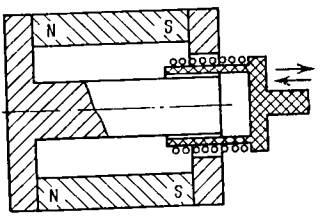


Рис. 13.11. Индукционный датчик скорости линейного перемещения

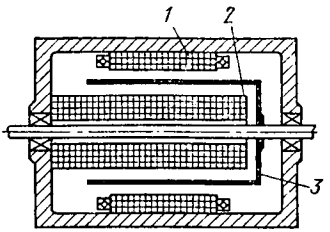


Рис. 13.12. Асинхронный тахогенератор

Для контроля частоты вращения используются датчики в виде тахогенераторов и импульсных индукционных датчиков. Тахогенератор постоянного тока может представлять собой генератор малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. ЭДС на выходе такого генератора пропорциональна частоте его вращения n:

$$E = kn.$$

Для повышения линейности выходной характеристики сопротивление нагрузки должно быть возможно больше (уменьшается реакция якоря). Переходное сопротивление щеток вносит существенную погрешность.

Более надежны асинхронные тахогенераторы (рис. 13.12). Обмотка статора *1* питается от источника переменного тока частотой 400—500 Гц. Обмотка *2* неподвижна и сдвинута относительно обмотки *1* на 90°. Полый алюминиевый ротор *3* связан с валом, скорость которого контролируется.

При неподвижном роторе пульсирующий поток от об-

мотки *1* не вызывает ЭДС в выходной обмотке, так как оси обмоток сдвинуты на 90°. При вращении ротора *3* в нем возникают ЭДС и токи резания, пропорциональные частоте вращения. Эти токи создают поперечное магнитное поле, изменяющееся с частотой питания. Возникающая в обмотке *2* под действием магнитного поля ротора ЭДС имеет амплитуду, пропорциональную угловой скорости ротора:

$$E \equiv \omega.$$

Достоинством такого датчика является отсутствие щеток и неизменность частоты выходного сигнала.

Если обмотку *1* питать от сети постоянного тока, то обмотка *2* выдает ЭДС, пропорциональную угловому ускорению вала.

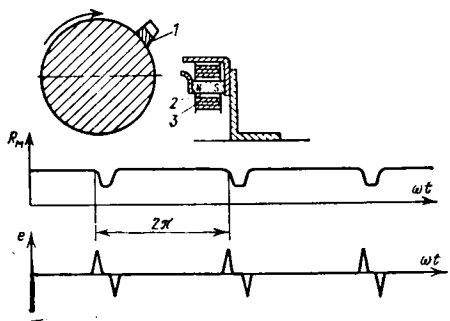


Рис. 13.13. Импульсный индукционный датчик

На рис. 13.13 показан импульсный индукционный датчик. На вращающемся валу укреплен выступ *1* из магнитомягкой стали. При прохождении выступа мимо рабочего зазора магнитное сопротивление $R_м$ для потока постоянного магнита резко уменьшается.

При нарастании потока появляется первый импульс ЭДС в выходной обмотке *3*. При спадании потока — второй. За один оборот появляется два импульса ЭДС. Число импульсов в единицу времени считывается измерительным устройством. Достоинство датчика — в точности, не зависящей от качества выполнения магнитной системы, старения постоянного магнита, расстояния между валом и магнитом и других факторов. Источником погрешности для первых двух типов датчиков является изменение сопротивления обмоток под действием температуры.

Специальными мерами погрешность можно уменьшить до 0,5—1,5 % [13.2].

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ УПРАВЛЕНИЯ

14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для регулирования частоты вращения, вращающего момента на валу, для соединения и разъединения ведущего и ведомого валов применяются электрические аппараты в виде муфт с электрическим управлением. Эти муфты можно подразделить на индукционные и электромагнитные.

Индукционные муфты (рис. 14.1) по принципу действия аналогичны асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором. Приводной двигатель соединяется со сплошным якорем *1*, ведомый вал связан с индуктором *2*. Катушка

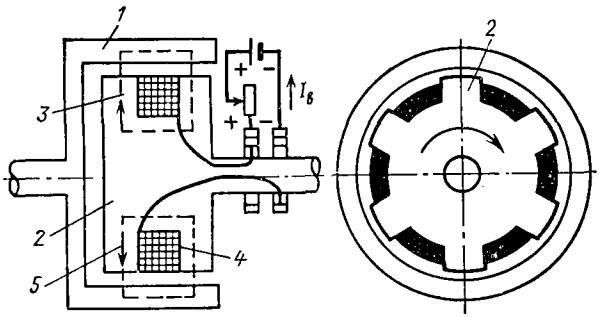


Рис. 14.1. Индукционная муфта:

1 — якорь; *2* — индуктор; *3* — магнитная система; *4* — катушка возбуждения; *5* — магнитный поток

возбуждения *4* создает постоянный магнитный поток *5*, замыкающийся по якорю *1*. При вращении якоря магнитное поле катушки индуктора пересекает цилиндрическое тело якоря, и в нем наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создает силу, которая увлекает индуктор в направлении вращения якоря. Материал якоря должен обладать малым удельным электрическим сопротивлением, что обеспечивает возникновение достаточно больших вихревых токов, и высокой магнитной проницаемостью для получения возможно больших значений магнитного потока.

Регулируя ток возбуждения $I_в$ и тем самым меняя маг-

нитное поле, можно плавно регулировать в широких пределах частоту вращения и передаваемый вращающий момент ведомого вала.

На рис. 14.2 показаны механические характеристики индукционной муфты. На этом рисунке $I_{в*}=I_в/I_{в,ном}$ — ток возбуждения в относительных единицах; $M_*=M/M_{ном}$ — передаваемый момент в относительных единицах, где $M_{ном}$ — номинальный момент муфты; $I_{в,ном}$ — соответствующий ему номинальный ток возбуждения; n — частота вращения в процентах частоты вращения при отсутствии на ведомом валу нагрузки.

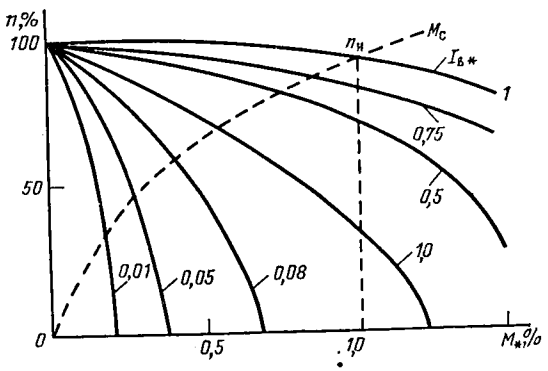


Рис. 14.2. Механические характеристики индукционной муфты при различном токе возбуждения

При увеличении момента нагрузки угловая скорость ведомого вала уменьшается. При этом возрастают скольжение и токи, наводимые в якоре муфты. Увеличение токов в якоре увеличивает момент, развиваемый муфтой и передаваемый на ведомый вал.

Механические характеристики индукционной муфты существенно зависят от нагрузки. Поэтому для стабилизации скорости применяются специальные регулирующие устройства.

Более широко применяются электромагнитные муфты, в которых используется электромагнитное усилие притяжения между ферромагнитными телами (§ 5.6). Эти муфты удобны в эксплуатации, имеют малые габаритные размеры и небольшое время срабатывания, передают большие мощности на валу при сравнительно малой мощности управления. Ниже рассматриваются фрикционные, ферропорошковые и гистерезисные электромагнитные муфты.

а) **Принцип действия.** Простейшая конструкция электромагнитной фрикционной муфты представлена на рис. 14.3. Постоянное напряжение подводится к щеткам, скользящим по контактным кольцам *1*, соединенным с выводами обмотки *2*. Обмотка имеет цилиндрическую форму и окружена магнитопроводом ведущей части *3* муфты. Направляющая втулка *7* имеет выступ *6*, который входит в паз *8* полумуфты *5*, которая может перемещаться вдоль оси, оставаясь соединенной с валом *10*.

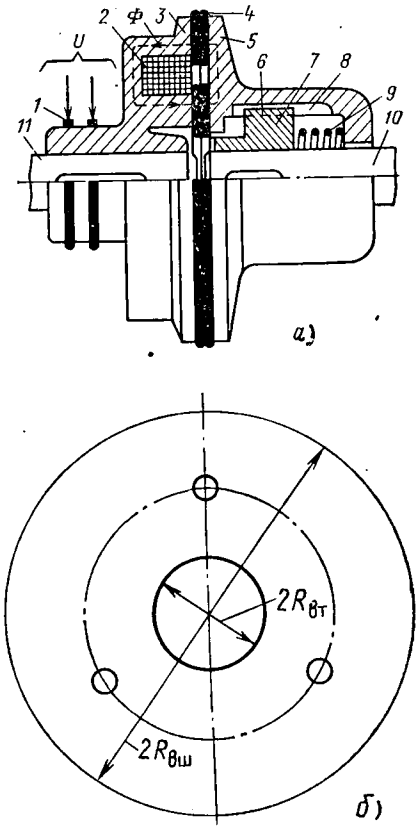


Рис. 14.3. Электромагнитная фрикционная муфта:
а — разрез муфты; *б* — поверхность трения

В обесточенном состоянии пружина *9* упирается в направляющую втулку *7*, жестко закрепленную на валу *10*, отодвигает подвижную часть полумуфты *5* вправо. При том поверхности трения (диски *4*) не соприкасаются и ведомый вал *10* разобщен с ведущим валом *11*.

При подаче на обмотку управляющего напряжения возникает магнитный поток Ф. На полумуфты *3*, *5*, выполненные из магнитомягкого материала, начинает действовать электромагнитная сила, притягивающая их друг к другу. Таким образом полумуфты и обмотка представляют собой электромагнит. Между дисками *4*, жестко связанными с деталями *3* и *5*, возникает сила нажатия, обеспечивающая необходимую силу трения и их надежное сцепление.

На рис. 14.3, *б* изображена поверхность трения. Элементарный момент трения

$$dM_{тр} = k_{тр}\, p_{уд}\, 2\pi R^2\, dR, \qquad (14.1)$$

где $p_{уд}$ — давление на поверхности трения, Па; $k_{тр}$ — коэффициент трения; R — текущий радиус поверхности трения, м.

Результирующий момент, развиваемый муфтой,

$$M_{тр} = \int_{R_{вт}}^{R_{вш}} dM_{тр} = 2\pi k_{тр}\, p_{уд}\, \frac{R_{вш}^3 - R_{вт}^3}{3} =$$

$$= \frac{2}{3}\, \pi k_{тр}\, p_{уд}\, R_{вт}\, (1 - \beta^3), \qquad (14.2)$$

где $\beta = R_{вт}/R_{вш}$; $R_{вш}$, $R_{вт}$ — внешний и внутренний радиусы трущихся поверхностей дисков *4*, обычно $\beta = 0{,}3 \div 0{,}8$.

Коэффициенты трения для дисков из различных материалов приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1. **Коэффициенты трения**

Материал	Режим покоя	Режим движения
Сталь — сталь	0,15	0,15
Сталь — чугун	0,3	0,18
Сталь — бронза	0,15	0,15
Чугун — чугун	0,15	0,15
Металлокерамический материал на медной основе — сталь	0,3—0,4	—
Металлокерамический материал на железной основе — сталь	0,4—0,8	—

Наиболее совершенны диски из металлокерамики. Металлокерамика на медной основе состоит из 68 % меди 8 % олова, 7 % свинца, 6 % графита, 4 % кремния и 7 % железа. Составляющие в порошкообразном состоянии прессуются при высоком давлении (сотни мегапаскалей) и затем спекаются при температуре 700—800 °С. Аналогично изготовляется металлокерамика на железной основе. Металлокерамические материалы имеют высокое значение $k_{тр}$ и допускают высокую рабочую температуру (до 200 °С).

Давление $p_{уд}$ определяется износом поверхностей трения дисков. Для металлокерамических материалов оно составляет 0,8—1, для сталей 0,4—0,6 МПа.

В процессе пуска момент, который должен быть передан муфтой, возрастает, так как кроме статического момента нагрузки $M_н$ необходимо передать динамический момент $M_{дин}$. При этом проскальзывание (пробуксовка) поверхностей трения должно быть небольшим, иначе они могут выйти из строя из-за нагрева до высокой температуры. В режиме пуска

$$M_{тр} = M_н + M_{дин} = M_н + J\frac{d\omega}{dt} = M_н k_з, \qquad (14.3)$$

где J — момент инерции подвижных частей, кг·м²; ω — угловая частота вращения, 1/с; $k_з$ — коэффициент запаса, учитывающий возрастание момента муфты при пуске. Значения $k_з$ для различных видов нагрузок приведены ниже:

Вид нагрузки	$k_з$
Металлорежущие станки . .	1,25—2,5
Краны, подъемники	3—5
Центробежные насосы . . .	2—3
Воздуходувки	1,25—2
Мельницы, дробилки	4,0

При большом передаваемом моменте для уменьшения габаритных размеров муфты применяется многодисковая система (рис. 14.4). Диски *6* связаны с ведущей частью муфты *5* и могут свободно перемещаться вдоль направляющих *7*. Диски *8*, связанные с электромагнитом ведомой части, также могут перемещаться по направляющей *4*. В данной конструкции магнитный поток, создаваемый обмоткой *1*, не проходит через диски, а замыкается через магнитопровод *2* и якорь *3*, что позволяет уменьшить зазор электромагнита. Момент, развиваемый такой муфтой,

$$M_{тр} = M_д(n - 1), \qquad (14.4)$$

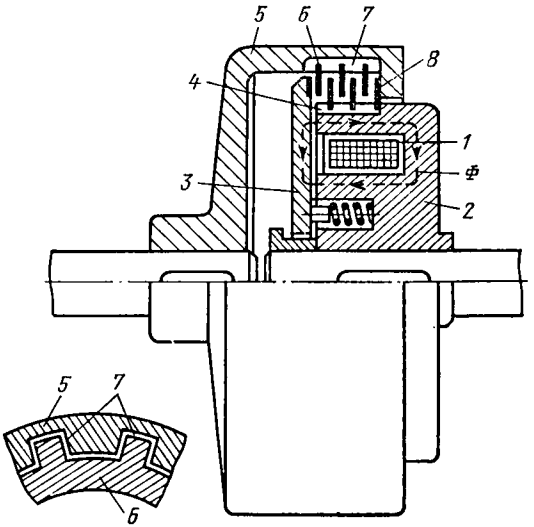


Рис. 14.4. Многодисковая фрикционная муфта

где $M_д$ — момент трения одной пары дисков; n — общее число дисков.

Зная поверхность трения S и допустимое давление на поверхности одного диска $p_{уд}$, можно найти основные параметры электромагнита. Поскольку рабочий зазор мал и магнитное поле в рабочем зазоре равномерно, определить электромагнитное усилие можно по формуле Максвелла (§ 5.6).

Электромагнитное усилие создается двумя полюсами с кольцеобразной поверхностью. Соответственно

$$p_{уд} S = P_{эм} = P_{эм1} + P_{эм2} = B_{\delta 1}^2 S_1/(2\mu_0) + B_{\delta 2}^2 S_2/(2\mu_0),$$

где S_1—поверхность полюса с меньшим радиусом; S_2 — поверхность полюса с большим радиусом. Положим $S_1 = S_2$.

Поскольку $\Phi_{\delta 1} = \Phi_{\delta 2}$, то при $S_1 = S_2 = S$

$$B_{\delta 1} = B_{\delta 2} = B_\delta = \sqrt{p_{уд} S \mu_0 / S} = \sqrt{p_{уд} \mu_0}.$$

Расчет магнитной цепи и обмотки ведется по методике § 5.2, 5.4. Коэффициенты рассеяния для магнитных систем даны в [14.1].

Видоизменением электромагнитной муфты является электромагнитный тормоз. В обесточенном состоянии пружина создает необходимое давление на диски трения и вал

надежно заторможен. Для освобождения вала необходимо подать напряжение на электромагнит, преодолевающий силу пружины. При остановке вращающегося вала вся кинетическая энергия превращается в тепло

$$J\frac{\omega_0^2}{2} = M_{тр}\alpha_{тр} = cmn(\theta_{доп} - \theta_0), \qquad (14.5)$$

где J — момент инерции подвижных частей; ω_0 — начальная угловая скорость; $M_{тр}$ — момент трения; $\alpha_{тр}$ — угол поворота вала, при котором происходит торможение; c — удельная теплоемкость материала дисков; m — масса диска; n — число дисков; $\theta_{доп}$ — допустимая температура материала диска; θ_0 — температура окружающей среды.

Уравнение (14.5) позволяет рассчитать параметры электромагнитного тормоза с точки зрения нагрева.

Недостатком конструкций, изображенных на рис. 14.3 и 14.4, является наличие скользящего контакта.

Разработаны конструкции муфт, у которых катушка возбуждения неподвижна, а магнитный поток проходит через притягивающиеся ферромагнитные детали ведущей и ведомой частей муфты [14.1]. Однако передаваемый такими муфтами момент значительно ниже, чем у контактных.

б) **Динамический режим электромагнитной муфты.** При включении муфты различают три этапа. Первый этап — с момента подачи напряжения до момента соприкосновения дисков. Длительность этого этапа определяется только параметрами самой муфты. Расчет времени трогания и времени движения якоря производится по формулам § 5.7.

Второй этап — с момента соприкосновения дисков до окончания их проскальзывания относительно друг друга. Для определения длительности второго этапа рассмотрим уравнения движения ведущих и ведомых частей

$$J_1\frac{d\omega_1}{dt} = M_д - M_{тр}; \qquad (14.6)$$

$$J_2\frac{d\omega_2}{dt} = M_{тр} - M_н, \qquad (14.7)$$

где J_1 и J_2 — моменты инерции ведущей и ведомой частей; ω_1 — угловая скорость ведущей части передачи; ω_2 — угловая скорость ведомой части передачи; $M_д$ — момент, развиваемый электродвигателем; $M_{тр}$ — момент трения в муфте; $M_н$ — момент нагрузки на ведомой части муфты.

Введем скорость скольжения ω_c ведущей части относительно ведомой:

$$\omega_c = \omega_1 - \omega_2.$$

Тогда из системы (14.6), (14.7) получим

$$\frac{d\omega_c}{dt} = \frac{1}{J_1} M_д - \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2}\right) M_{тр} + \frac{1}{J_2} M_н. \quad (14.8)$$

Для решения (14.8) необходимо знать изменение $M_д$, $M_{тр}$, $M_н$ в динамике. В общем случае $M_д$ является функцией скорости ω_1, момент $M_{тр}$ зависит от $p_{уд}$ и $k_{тр}$, а момент нагрузки $M_н$ зависит от скорости ω_2 и времени t. С целью упрощения решения зависимости $M_д$, $M_{тр}$ и $M_н$ линеаризуются на малых участках изменения скорости. По найденной зависимости $\omega_c = f(t)$ из (14.8) определяется время t, при котором $\omega_c = 0$, т. е. время скольжения.

На третьем этапе (разгон) ведущая и ведомая части муфты жестко связаны. Время разгона определяется решением уравнения

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_д - M_н, \quad (14.9)$$

где J — момент инерции всех движущихся частей; $M_д$ — момент двигателя; $M_н$ — момент сопротивления.

Временем включения муфты называется промежуток времени от момента подачи напряжения на электромагнит до достижения вращающим моментом 0,9 установившегося значения.

Время включения возрастает с увеличением габаритов муфты, постоянной времени электромагнита, хода якоря, числа дисков и обычно находится в пределах от 0,07 до 0,3 с.

Время отключения представляет собой промежуток времени от обесточивания электромагнита до спада вращающего момента до 0,05 номинального значения. Это время увеличивается с ростом габаритных размеров муфты, магнитного потока и колеблется от 0,1 до 0,4 с.

При каждом сцеплении муфты происходит нагрев дисков за счет энергии, выделяемой при проскальзывании. Допустимое число включений муфты определяется температурой нагрева дисков [14.1].

Электромагниты муфт выполняются на постоянном токе, что упрощает технологию изготовления и уменьшает габаритные размеры муфты (§ 5.6). При питании переменным

током полупроводниковые выпрямители могут встраиваться в муфту, причем переменный ток подается непосредственно на кольца. Для повышения быстродействия муфт применяется форсировка, описанная в § 5.7.

Электромагниты муфты изготавливаются из сплошного материала и поэтому имеют большую постоянную времени. При отключении муфты на контактах коммутирующего аппарата возникает дуга, которая замедляет процесс отключения и вызывает сильную эрозию контактов. При быстром обрыве дуги возможны возникновение перенапряжения и пробой обмотки. Для облегчения процесса отключения обмотка шунтируется разрядным резистором (рис. 3.9, *а*). Для устранения залипания якоря в притянутом состоянии магнитная система должна иметь конечный зазор.

14.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ФЕРРОПОРОШКОВЫЕ МУФТЫ

В ферропорошковой муфте барабанного типа (рис. 14.5) ведущий вал *1* через немагнитные фланцы *2* соединен с ферромагнитным цилиндром (барабаном) *3*. Внутри цилиндра располагается электромагнит *4*, связанный с ведомым валом *6*. Обмотка *5* электромагнита питается через контактные кольца (на рисунке не показаны). Внутренняя полость *7* заполнена ферромагнитным порошком (чистое или карбонильное железо) с зернами размером от 4—6 до 20—50 мкм, смешанными с сухим (тальк, графит) или жидким (трансформаторное, кремнийорганические масла) наполнителем. При обесточенной обмотке и вращении ведущей части (барабана) электромагнит и ведомый вал остаются неподвижными, поскольку ферромагнитные зерна наполнителя свободно перемещаются относительно друг друга. Определенное трение между барабаном и электромагнитом существует, но оно относительно невелико.

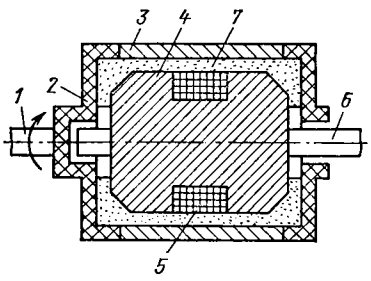


Рис. 14.5. Электромагнитная ферропорошковая муфта барабанного типа

При подаче напряжения на электромагнит зерна ферромагнитного порошка теряют свободу перемещения под воздействием магнитного поля обмотки. Вязкость среды, находящейся в барабане, резко возрастает. Увеличивается сила трения между барабаном и электромагнитом. На ведомом валу появляется вращающий момент.

При определенном значении тока возбуждения ферромагнитный порошок и наполнитель полностью затвердевают. Барабан и электромагнит становятся жестко связанными. Можно рассматривать передаваемый момент как момент от силы трения, действующей между порошком и внутренней цилиндрической поверхностью барабана.

Сила трения, возникающая на единице внутренней поверхности барабана,

$$p_{\text{тр,уд}} = k_{\text{тр,эк}}\, p_{\text{уд}} = k_{\text{тр,эк}}\, \frac{B^2}{2\mu_0\, \mu_{rc}}, \qquad (14.10)$$

где $\kappa_{\text{тр,эк}}$ — эквивалентный коэффициент трения; $p_{\text{уд}}$ — удельное усилие, нормальное к ведущей поверхности, оно создается магнитным потоком и равно $B^2/(2\mu_0\mu_{rc})$; B — индукция в зазоре; μ_{rc} — относительная магнитная проницаемость смеси.

Момент, передаваемый муфтой,

$$M_{\text{тр}} = 2\pi R^2\, L p_{\text{тр,уд}} = \pi R^2\, L k_{\text{тр,эк}}\, \frac{B^2}{\mu_0\, \mu_{rc}}, \qquad (14.11)$$

где R — радиус барабана; L — его длина.

Благодаря тому что зазор между барабаном и электромагнитом заполнен ферромагнитной смесью, его магнитная проводимость очень велика, что позволяет уменьшить необходимую МДС обмотки и увеличить коэффициент управления муфты, равный отношению передаваемой мощности к мощности управления (мощности электромагнита).

Если положить, что магнитные сопротивления барабана и электромагнита равны нулю и μ_{rc}=const, то момент, передаваемый муфтой, пропорционален квадрату тока:

$$M = \pi R^2\, L\, \frac{B^2}{\mu_{rc}\, \mu_0}\, k_{\text{тр,эк}} = \pi R^2\, L k_{\text{тр,эк}}\, \frac{1}{\mu_{rc}\, \mu_0} \left(\frac{I w}{2\delta}\, \mu_0\, \mu_{rc} \right)^2 =$$

$$= \frac{1}{4}\, \pi R^2\, L k_{\text{тр,эк}}\, \frac{\mu_0\, \mu_{rc}}{\delta^2}\, (F)^2, \qquad (14.12)$$

где δ — зазор между электромагнитом и барабаном; F — МДС электромагнита.

В действительности из-за насыщения магнитной цепи

при большой МДС зависимость $M=f(I)$ близка к линей ной.

Рассмотрим характеристики муфты в статическом ре жиме. Во втором квадранте рис. 14.6 изображена зависи мость момента, передаваемого муфтой, от тока возбужде ния $I_в$. В первом квадранте представлены механическа характеристика двигателя $M_д=f(\omega_1)$ и характеристик нагрузки $M_н=f(\omega_2)$. Пока $I_x<I_1$, момент, передаваемы муфтой, меньше момента нагрузки при $\omega_2=0$ и ведомы вал неподвижен. При $I_x>I_1$ муфта развивает момент M и ведомый вал имеет скорость ω_2 (точка a') при скорост двигателя ω_1 (точка a'').

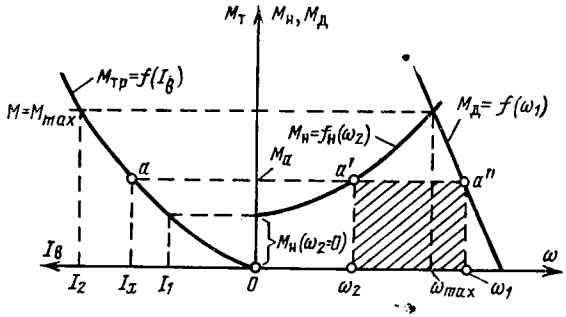


Рис. 14.6. Характеристики муфты и приводного двигателя

Мощность, отдаваемая двигателем, $P_{дв}=M_a\omega_1$, а мощ ность, передаваемая в нагрузку, $P_н=M_a\omega_2$. Потери в муф те за счет скольжения

$$P_п = P_{дв} - P_н = M_a(\omega_1 - \omega_2). \qquad (14.13)$$

Эта мощность пропорциональна заштрихованной площа ди прямоугольника. Потери $P_п$ расходуются на нагрев муф ты и наряду с потерями мощности в обмотке электромаг нита определяют ее температуру.

При токе возбуждения I_2 ведомый и ведущий валы сое динены жестко и вращаются с угловой скоростью ω_{max}. Пе редаваемый момент $M=M_{max}$, а потери $P_п=0$. Для расче та температуры муфты необходимо определить $P_{пmax}$.

Пусть моменты $M_н$ и $M_д$ линейно зависят от угловой скорости:

$$M_н = M_{н0} + k_н\omega_2; \qquad (14.14$$

$$M_д = k_д(\omega_{10} - \omega_1), \qquad (14.15$$

е $M_{н0}$ —начальный момент нагрузки ($\omega_2=0$); $k_н$ и $k_д$ — эффициенты пропорциональности; ω_{10} — угловая ско-ость двигателя при холостом ходе.

Воспользовавшись (14.13) — (14.15), выразим потери $P_п$ рез M:

$$P_п = M(\omega_{10} + M_{н0}/k_н) - M^2(1/k_н + 1/k_д). \qquad (16.16)$$

ри $\omega=\omega_1=\omega_2=\omega_{max}$ $P_п=0$. Тогда максимальный момент /фты

$$M_{max} = \frac{\omega_{10} + M_{н0}/k_н}{1/k_н + 1/k_д}. \qquad (14.17)$$

Для определения $P_{пmax}$ необходимо производную $P_п/dM$ приравнять нулю. Передаваемый момент

$$M = \frac{\omega_{10} + M_{н0}/k_н}{2(1/k_п + 1/k_д)} = \frac{M_{max}}{2}; \qquad (14.18)$$

$$P_{пmax} = \frac{(\omega_{10} + M_{н0}/k_н)^2}{4(1/k_н + 1/k_д)}. \qquad (14.19)$$

Охлаждающая поверхность муфты $S_{охл}$ выбирается из словия

$$P_{пmax} + P_{кат} = k_т S_{охл}(\Theta_{пред} - \Theta_0), \qquad (14.20)$$

де $P_{кат}$ — мощность потерь в обмотке; $k_т$ — коэффициент еплоотдачи с внешней поверхности барабана; $S_{охл}$ — площадь внешней поверхности барабана; $\Theta_{пред}=80\div120°$— ;редельно допустимая температура поверхности барабана.

На зерна ферромагнитного порошка кроме электромагнитных сил $P_{эм}$ действуют центробежные силы $P_ц$, пропорциональные квадрату угловой скорости. Для оценки влияния центробежных сил вводится отношение $k_ц = P_ц/P_{эм}$. Это отношение увеличивается с ростом диаметра муфты, угловой скорости и уменьшается с ростом индукции в зазоре. Даже при $B=1{,}8$ Тл отношение $P_ц/P_{эм}$ достигает 40 %, если частота вращения равна 3000 об/мин [14.1]. При определенном значении частоты вращения отношение $P_ц/P_{эм}$ приближается к 100 % и муфта теряет управление. Поэтому ферропорошковые муфты не применяют при скоростях более 3000 об/мин.

По сравнению с электромагнитными муфтами трения ферропорошковые муфты имеют значительно большее быстродействие (примерно в 10 раз) благодаря отсутствию якоря. Изменение момента во времени для линейной части характеристики $M(I)$ определяется законом роста тока I,

Поэтому в схемах автоматики порошковая муфта являет инерционным звеном первого порядка. Большим преим ществом ферропорошковой муфты является отсутствие б строизнашивающихся дисков трения.

Ферропорошковые муфты целесообразно применять та где требуются высокое быстродействе, большая часто включения и плавное регулирование скорости ведомого в ла. Недостатком ферропорошковых муфт является меньш передаваемая мощность при одинаковых габаритных ра мерах с муфтой трения.

14.4. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МУФТЫ

Возможны два варианта исполнения гистерезисны муфт: в первом — магнитное поле индуктора создается об моткой, во втором — постоянными магнитами. Недостатко

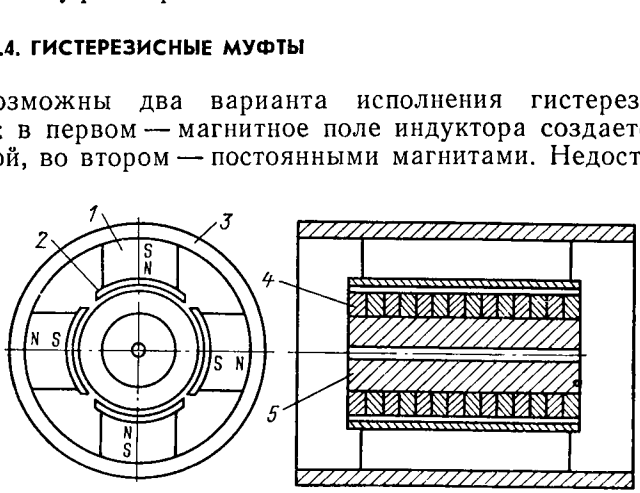


Рис. 14.7. Магнитогистерезисная муфта с радиальным рабочим зазоро

первого варианта является наличие контактной системы дл передачи тока в индуктор, достоинством — возможност электрического управления муфтой. Муфты с постоянным магнитами (магнитогистерезисные) обладают высокой на дежностью. Однако регулирование передаваемого момент в них затруднено.

В магнитогистерезисной муфте (рис. 14.7) постоянны магниты *1* с полюсными наконечниками *2* укреплены в маг нитопроводе *3* индуктора, связанного с ведущим валом. Н ось ведомого вала насажен ротор, состоящий из втулки из немагнитного или магнитомягкого материала и коле *4* активного слоя. Кольца активного слоя изготовлены и материала с довольно широкой петлей гистерезиса, имею

щей высокие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы. Шихтованная структура активного слоя позволяет уменьшить вихревые токи и асинхронный вращающий момент.

Пусть ротор заторможен, а индуктор вращается приводным двигателем с угловой скоростью ω_1. Под действием вращающегося магнитного поля индуктора в активном слое появляются потери на гистерезис от перемагничивания. Потери за один цикл перемагничивания определяются максимальным значением индукции в активном слое ротора. Частота перемагничивания активного слоя

$$f_1 = p\omega_1/(2\pi), \tag{14.21}$$

где p — число пар полюсов индуктора.

Мощность, передаваемая активному слою через рабочий зазор,

$$P_{г1} = p_г f_1 V_г, \tag{14.22}$$

где $p_г$ — удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания; $V_г$ — объем активного слоя.

Взаимодействие поля постоянных магнитов индуктора с полем, созданным активным слоем, создает на роторе гистерезисный момент

$$M_г = \frac{P_{г1}}{2\pi n_1} = \frac{1}{2\pi} p p_г V_г. \tag{14.23}$$

Если ведомый вал не заторможен, то под действием момента $M_г$ ротор начнет вращаться в направлении вращения индуктора со скоростью ω_2. Скольжение ротора относительно индуктора

$$s = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1. \tag{14.24}$$

Скольжение будет меняться от 1 до 0 при $n_2 = n_1$. В процессе разгона ротора частота перемагничивания меняется и становится равной

$$f_2 = \frac{p\omega_2}{2\pi} = f_1 s. \tag{14.25}$$

При этом потери на гистерезис уменьшаются:

$$P_{г2} = p_г f_2 V_г. \tag{14.16}$$

Полезная мощность, передаваемая на ведомый вал,

$$P_2 = P_{г1} - P_{г2} = p_г f_1 (1 - s) V_г. \tag{14.27}$$

Момент, передаваемый муфтой на ведомый вал,

$$M_г = \frac{P_2}{2\pi n_2} = \frac{p_г f_1 (1 - s) V_г}{2\pi n_1 (1 - s)} = \frac{p_г f_1 V_г}{2\pi n_1}. \tag{14.28}$$

Таким образом, момент на ведомом валу не зависит от частоты его вращения. Если момент нагрузки $M_н \leqslant M_г$, то скорость ω_2 ведомого вала увеличивается, пока не станет равной ω_1. Муфта достигает синхронной частоты вращения. В этом режиме активный слой ротора можно рассматривать как постоянный магнит, вращающийся синхронно с полем (рис. 14.8), а сама муфта становится аналогичной синхронному двигателю. По мере увеличения нагрузки возрастает угол θ между векторами вращающегося поля индуктора

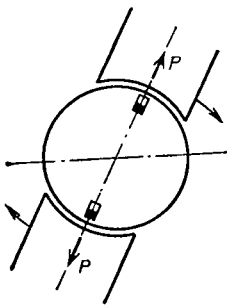


Рис. 14.8. Синхронный режим гистерезисной муфты

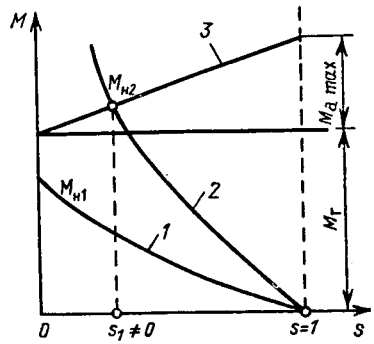


Рис. 14.9. Механические характеристики гистерезисной муфты

и активного слоя, и при $M_н = M_г$ этот угол достигает максимального значения θ_{max}. Значение θ_{max} зависит от свойств материала активного гистерезисного слоя. В общем случае момент, развиваемый гистерезисной муфтой, выражается [14.3] как

$$M_г = cF\Phi_\delta \sin\theta, \qquad (14.29)$$

где c — конструктивный фактор; F — МДС индуктора; Φ_δ — магнитный поток в гистерезисном слое.

Угол θ при передаче момента нагрузки $M_н$

$$\theta = \arcsin \frac{M_н}{cF\Phi_\delta}. \qquad (14.30)$$

При дальнейшем возрастании момента нагрузки ($M_н > M_г$) муфта переходит в асинхронный режим, когда частота вращения муфты меньше частоты вращения индуктора.

На рис. 14.9 изображены механические характеристики муфты, представляющие собой зависимости момента нагрузки $M_н$ и момента муфты $M_г$ от скольжения. Пока $M_н \leqslant M_г$, ведомый вал вращается с синхронной скоростью ($s=0$) (кривая *1*). Если $M_н > M_г$, то ведомый вал вращается со скольжением (кривая *2*). Однако момент, передаваемый муфтой, остается постоянным, равным $M_г$.

При $M_н > M_г$ угол $\theta = \theta_{max}$ остается неизменным, т. е. ось полюсов, наведенных в активном слое, продолжает вращаться синхронно с полем индуктора, отставая при этом на постоянный угол θ_{max}. В то же время ротор движется со скольжением s. Если активный слой выполнен в виде литого цилиндра, то за счет вихревых токов кроме гистерезисного момента $M_г$ появляется асинхронный момент (прямая *3*), пропорциональный скольжению:

$$M = M_г + M_{amax} s.$$

В этом режиме скольжение $s \neq 0$, угловая скорость $\omega_2 < \omega_1$, ротор отстает от вращающегося индуктора и в нем создается дополнительный момент, как в асинхронном двигателе.

Преимущество гистерезисной муфты заключается в постоянстве передаваемого момента. Если нагрузочный момент $M_н$ резко возрастает (неполадки, поломки механизма), то максимальный момент, передаваемый на приводной двигатель, ограничен $M_г$ и гистерезисная муфта защищает двигатель от перегрузки. Постоянство момента муфты обеспечивает быстрый разгон нагрузки.

В ряде схем автоматики необходима быстрая остановка привода. В этих случаях применяются тормоза на базе гистерезисной муфты. Ведомая часть муфты делается неподвижной, а ведущая соединяется с приводным двигателем. При торможении двигатель отключается и включается муфта. Постоянный тормозной момент муфты обеспечивает быструю остановку привода.

Гистерезисные муфты широко применяются для передачи момента в агрессивную среду, отделенную от окружающей среды металлической немагнитной оболочкой и находящуюся под высоким давлением. В этом случае применяются муфты с аксиальным рабочим зазором. Ведущая часть с индуктором отделена немагнитной стенкой от ведомой части с активным слоем в виде колец.

Вопросы теории, конструкции и проектирования магнито-гистерезисных муфт подробно рассмотрены в [14.3].

Часть третья

АППАРАТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Глава пятнадцатая

РУБИЛЬНИКИ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Рубильник предназначен для ручного включения и отключения электрических цепей с постоянным напряжением до 440 и переменным до 500 В.

Переключатель в отличие от рубильника имеет две системы неподвижных контактов и три коммутационных положения. В среднем положении ножей цепи разомкнуты. Специальное устройство фиксирует ножи в этом положении.

Пакетные выключатели и переключатели являются малогабаритными коммутационными аппаратами с ручным приводом, которые служат для одновременного управления большим числом цепей. Пакетные выключатели и переключатели используются для нечастых коммутаций в цепях с небольшой мощностью (токи до 400 А, постоянное напряжение 220 и переменное 380В). Пакетные переключатели и выключатели применяются как аппараты распредустройства и в цепях автоматики. Они используются также для пуска и реверса двигателей, а также для переключения схемы соединения обмоток двигателя со звезды на треугольник.

В трехфазном рубильнике с центральной рукояткой (рис. 15.1) подвижный контакт — нож *1* вращается в шарнирной стойке *2*. При размыкании цепи между ножом и неподвижным контактом стойки *3* загорается дуга. Гашение дуги постоянного тока при токе до 75 А происходит за счет механического удлинения дуги движущимся ножом. Чем больше скорость движения контакта, тем больше скорость растяжения дуги и меньше время ее горения. При отключении больших токов решающим фактором является электродинамическая сила. Эта сила, действующая на единицу длины дуги, примерно обратно пропорциональна длине ножа. Для безопасности ремонта расстояние между контактными стойками *3* делается не менее 0,05 м.

На процесс гашения дуги влияют также тепловые потоки воздуха, создаваемые дугой. Дуга гасится более интенсивно, если ее растяжение за счет конвективного движения воздуха совпадает с направлением действия электродинамических сил (рубильник устанавливается так, что кривизна дуги обращена вверх).

При отключении переменного тока дуга гасится за счет возникновения электрической прочности 200—220 В около каждого катода рубильника (§ 4.7). В однофазной цепи двухполюсный рубильник позволяет легко гасить ду-

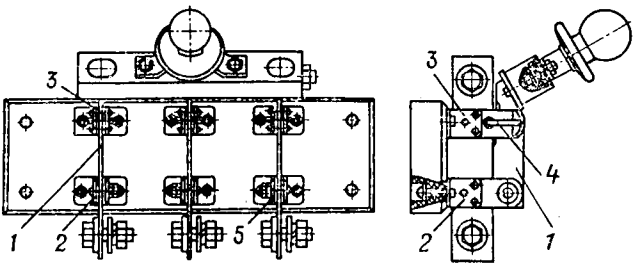


Рис. 15.1. Трехфазный рубильник с центральной рукояткой

гу с номинальным током при напряжении до 380 В. Однополюсный рубильник с одним разрывом надежно работает в цепи с напряжением до 220 В. Рубильники и переключатели с центральной рукояткой (рис. 15.1) разрешается применять только для отключения обесточенной цепи. При отключении цепей под нагрузкой дуга не должна воздействовать на руку (рукоятка находится сбоку или применяется рычажный привод, см. рис. 15.2). Как правило, наиболее тяжело отключаемый ток (критическое значение) меньше его номинального значения.

Для рубильников и переключателей с боковой рукояткой или рычажным приводом отношение отключаемого тока к номинальному составляет 0,2 при постоянном напряжении 220 В и 0,3 при переменном напряжении 380 В. При постоянном напряжении 440 и переменном 500 В указанные аппараты используются только для отключения обесточенных цепей. Для увеличения отключающей способности рубильник снабжается дугогасительной решеткой (см. § 4.11). При этом отключающая способность рубильников

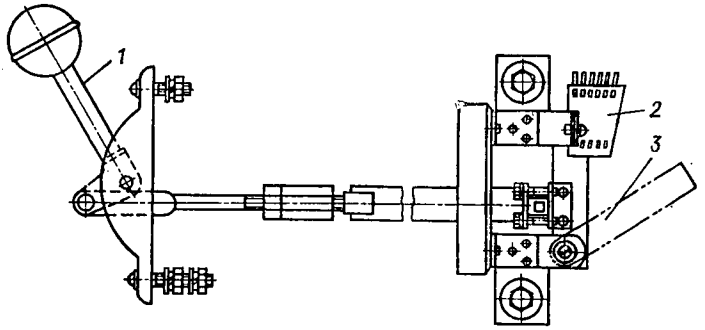


Рис. 15.2. Рубильник с рычажным приводом и дугогасительной камерой

увеличивается до 0,5 $I_{ном}$ при постоянном напряжении 440 и переменном 500 В, и до $I_{ном}$ в цепях с постоянным напряжением 220 и переменным 380 В.

15.2. КОНСТРУКЦИЯ РУБИЛЬНИКОВ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Рубильники выпускаются в одно-, двух- и трехполюсных исполнениях. На рис. 15.2 изображен трехполюсный рубильник с центральным рычажным приводом *1* и дугогасительной камерой *2*. Ножи *3* всех трех полюсов соединены изоляционным валиком, на который действует тяга рычажного привода. Рукоятка привода монтируется на лицевой стенке шкафа распредустройства. Такая конструкция обеспечивает безопасность обслуживающего персонала.

Качество рубильников и переключателей в значительной степени определяется контактным соединением ножа и контактных стоек. В современных аппаратах преимущественно применяется линейный контакт (§ 3.4), обладающий меньшим переходным сопротивлением, чем плоский. Контактное нажатие обеспечивается с помощью стальных пружин.

В рубильнике на рис. 15.1 нажатие в стойке *3* создается с помощью пружины в виде разрезанного кольца *4*, концы которого действуют на эластичные губки. Нажатие губок в шарнирной стойке *2* осуществляется пружинами в виде выпуклых шайб *5*. При токе, большем 100 А, устанавливается несколько параллельных контактных пар.

В пакетном выключателе или переключателе каждый коммутируемый полюс конструктивно оформлен в виде отдельного элемента — пакета. На рис. 15.3 аппарат имеет три полюса (три пакета), а на рис. 15.4 — два полюса. Число пакетов в выключателе серии ПКВ может достигать 8.

Пакетный выключатель ПВМ (рис 15.3) состоит из отдельных свя-

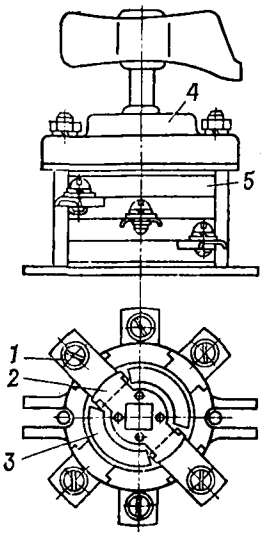


Рис. 15.3. Пакетный выключатель серии ПВМ

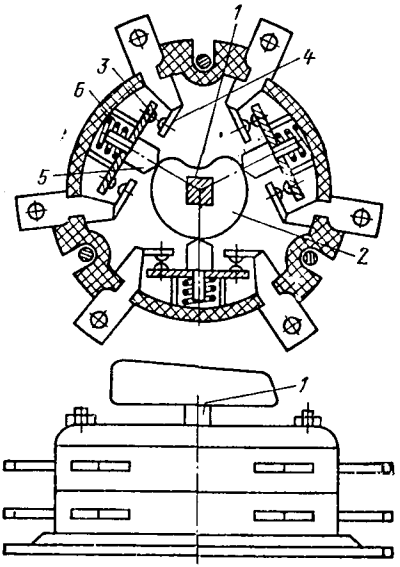


Рис. 15.4. Пакетный кулачковый выключатель серии ПКВ

занных вместе пакетов *5* и приводного механизма *4*. Каждый полюс имеет два разрыва. Неподвижные контакты *1* выполнены в виде массивных пластин из латуни. Подвижный контакт *2* насажен на квадратный изолированный вал выключателя и имеет вращательное движение. Нажатие контактов создается за счет упругих свойств губок подвижного контакта *2*. К подвижному контакту прикреплены две щечки *3* из фибровых пластин. Расстояние между щечками несколько больше толщины неподвижного контакта, что позволяет подвижному контакту свободно вращаться внутри пакета. Подвижный контакт перемещается с помощью приводного механизма. При вращении рукоятки сначала заводится пружина, а затем эта пружина сообщает необходимую скорость контакту. Такой привод работает недостаточно надежно.

При расхождении контактов дуга загорается в двух разрывах, что обеспечивает надежное гашение дуги переменного тока за счет околокатодной электрической прочности. Дуга гаснет при первом прохождении переменного тока через нуль.

Гашение дуги постоянного тока обеспечивается за счет ее горения в пространстве между фибровыми щечками. При соприкосновении дуги с фибровыми стенками из них выделяется газ. Поскольку внутренняя

полость пакета достаточно герметична, внутри пакета повышается давление. Это ведет к подъему вольт-амперной характеристики и гашению дуги (§ 4.2). Однофазные цепи должны отключаться двухполюсным выключателем.

Недостатками выключателя ПВМ являются невысокая износостойкость (до $20 \cdot 10^3$ циклов) и недостаточная надежность механизма привода.

Более совершенен пакетный кулачковый выключатель серии ПКВ (рис. 15.4). На валу *1* укреплены кулачки *2* (по одному на пакет). Каждая цепь имеет два разрыва, образуемые мостиками *3* и контактами *4*. При вращении вала кулачок поворачивается и в его углубление попадает шток *5*. При этом цепь замыкается. Нажатие контактов создается стальной пружиной *6*. Для повышения износостойкости используются металлокерамические контакты. Вместо малонадежного привода ПВМ используется такой же фиксатор положения, как в командоконтроллерах (см. рис. 7.5). Наибольший ток выключателей серии ПКВ составляет 160 А. Электрическая износостойкость достигает $2 \cdot 10^5$ циклов. Все пакетные выключатели используются для коммутации токов, равных номинальному.

Пакетные выключатели и переключатели по сравнению с рубильниками имеют меньшие габариты, удобнее в монтаже. Дуга гасится в замкнутом объеме, без выброса пламени и газов. Контактная система позволяет управлять одновременно большим количеством цепей. Эти выключатели коммутируют номинальные токи, имеют высокую вибро- и ударостойкость.

Глава шестнадцатая

ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Предохранители — это электрические аппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов КЗ. Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, включаемая последовательно с защищаемой цепью, и дугогасительное устройство.

К предохранителям предъявляются следующие требования.

1. Времятоковая характеристика предохранителя должна проходить ниже, но возможно ближе к времятоковой характеристике защищаемого объекта.

2. Время срабатывания предохранителя при КЗ должно быть минимально возможным, особенно при защите полу-

проводниковых приборов. Предохранители должны работать с токоограничением (§ 4.3).

3. При КЗ в защищаемой цепи предохранители должны обеспечивать селективность защиты.

4. Характеристики предохранителя должны быть стабильными, а технологический разброс их параметров не должен нарушать надежность защиты.

5. В связи с возросшей мощностью установок предохранители должны иметь высокую отключающую способность.

6. Конструкция предохранителя должна обеспечивать возможность быстрой и удобной замены плавкой вставки при ее перегорании.

16.2. НАГРЕВ ПЛАВКОЙ ВСТАВКИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Основной характеристикой предохранителя является времятоковая характеристика, представляющая собой зависимость времени плавления вставки от протекающего тока. Для совершенной защиты желательно, чтобы времятоковая характеристика предохранителя (кривая *1* на рис. 16.1) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемой цепи или объекта (кривая *2* на рис. 16.1). Однако реальная характеристика предохранителя (кривая *3*) пересекает кривую *2*. Поясним это. Если характеристика предохранителя соответствует кривой *1*, то он будет перегорать из-за старения или при пуске двигателя. Цепь будет отключаться при отсутствии недопустимых перегрузок. Поэтому ток плавления вставки выбирается больше номинального тока нагрузки. При этом кривые *2* и *3* пересекаются. В области больших перегрузок (область *Б*) предохранитель защищает объект. В области *А* предохранитель объект не защищает.

При небольших перегрузках (1,5÷2) $I_{ном}$ нагрев предохранителя протекает медленно. Большая часть тепла отдается окружающей среде. Сложные условия теплоотдачи затрудняют расчет плавкой вставки.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении ею установившейся температуры, называется пограничным током $I_{погр}$.

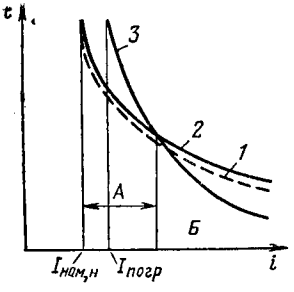


Рис. 16.1. Согласование характеристик предохранителя и защищаемого объекта

Для того чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе $I_{ном}$, необходимо $I_{погр} > I_{ном,н}$. С другой стороны, для лучшей защиты значение $I_{погр}$ должно быть возможно ближе к номинальному. При токах, близких к пограничному, температура плавкой вставки должна приближаться к температуре плавления.

В связи с тем, что время плавления вставки при пограничном токе велико (более 1 ч) и температура плавления ее материала составляет много сотен градусов Цельсия, все детали предохранителя нагреваются до высоких температур. Происходит тепловое старение плавкой вставки.

Для снижения температуры плавления вставки при ее изготовлении применяются легкоплавкие металлы и сплавы. Материалы плавких вставок и их свойства даны в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Металл вставки	Удельное сопротивление ρ_0, мкОм·м	Температура, °С		A', $А^2 \cdot с/мм^4$	A'', $А^2 \cdot с/мм^4$	$A'+A''$
		$\Theta_{доп}$	$\Theta_{пл}$			
Медь	0,0153	250	1083	80 000	11 600	91 600
Серебро	0,0147	—	961	62 000	8000	70 000
Цинк	0,06	200	419	9000	3000	12 000
Свинец	0,21	150	327	1200	400	1600

Примечание. $\Theta_{доп}$ — допустимая температура плавкой вставки при длительном протекании тока; $\Theta_{пл}$ — температура плавления вставки; A' и A'' — коэффициенты, определяющие время плавления при КЗ [см. (16.1) и (16.2)]. Время нагрева плавкой вставки от начальной температуры до полного ее разрушения определяется суммой коэффициентов $A'+A''$.

Наименьшую температуру плавления имеет свинец. Но удельное сопротивление свинца в 12 раз выше, чем у меди. Для того чтобы при прохождении данного тока вставка нагрелась до допустимой температуры (150 °С), ее сечение должно быть значительно больше, чем сечение вставки из меди.

При плавлении вставки пары металла ионизируются в возникающей дуге благодаря высокой температуре. Из-за большого объема вставки количество паров металла в дуге велико, что затрудняет ее гашение и уменьшает предельный ток, отключаемый предохранителем. Из-за этих особенностей вставок из легкоплавких металлов широкое рас-

ространение получили медные и серебряные плавкие вставки с металлургическим эффектом, который объясняется ниже. На тонкую медную проволоку (диаметром менее 0,001 м) наносится шарик из олова. При нагреве вставки сначала плавится олово, имеющее низкую температуру плавления (232 °С). В месте контакта олова с проволокой начинается растворение меди и уменьшение ее сечения. Это вызывает увеличение сопротивления и повышение потерь в этой точке. Процесс длится до тех пор, пока медная проволока не расплавится в точке расположения оловянного шарика. Возникшая при этом дуга расплавляет проволоку на всей длине. Применение оловянного шарика снижает среднюю температуру плавления вставки до 280 °С.

Отношение $I_{погр}/I_{ном}$ уменьшается до 1,2, что дает улучшение времятоковой характеристики.

Стабильность времятоковой характеристики в значительной степени зависит от окисления плавкой вставки. Свинец и цинк образуют на воздухе пленку оксида, которая предохраняет вставку от изменения сечения. Медная вставка при длительной работе и высокой температуре интенсивно окисляется. Пленка оксида при изменении температурного режима отслаивается, и сечение вставки постепенно уменьшается. В результате плавкая вставка перегорает при номинальном токе, если ее температура при токе, близком к пограничному, выбрана высокой. В табл. 16.1 приведены рекомендуемые допустимые температуры $\Theta_{доп}$ вставок при номинальном токе. Температура медной вставки при токе, близком к номинальному, должна быть значительно ниже тепмературы плавления. Поэтому приходится завышать сечение вставки и тем самым увеличивать отношение $I_{погр}/I_{ном}$ примерно до 1,8, что ухудшает защитные свойства предохранителя.

Серебряные плавкие вставки не подвержены тепловому старению, и для них отношение $I_{погр}/I_{ном}$ определяется только нагревом.

У вставок из легкоплавких материалов эксплуатационная температура ближе к температуре плавления, что позволяет снизить отношение $I_{погр}/I_{ном}$ до 1,2—1,4.

В настоящее время в качестве материала плавкой вставки начали применять алюминий [16.2]. Пленка оксида на поверхности вставки защищает алюминий от коррозии и делает характеристику предохранителя стабильной. Большее удельное сопротивление материала компенсируется увели-

чением сечения вставки. Алюминий имеет температур плавления ниже, чем у меди (658 против 1083 °С).

Времятоковые характеристики предохранителей с вставками постоянного сечения из легкоплавкого металл хорошо согласуются с характеристиками силовых транс форматоров и других подобных объектов. Это объясняетс низкой температурой плавления, стойкостью против корро зии и малой теплопроводностью материала таких вставок

Медная вставка из-за высокой теплопроводности, высо кой температуры плавления и большого отношения $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}}$ в области малых перегрузок не обеспечивает защиту объ екта (область A, рис. 16.1).

16.3. НАГРЕВ ПЛАВКОЙ ВСТАВКИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Если ток, проходящий через вставку, в 3—4 раза больше номинального, то практически процесс нагрева идет адиабатически, т. е. все тепло, выделяемое плавкой вставкой, идет на ее нагрев.

Согласно § 2.6 время нагрева вставки до температуры плавления

$$t_{\text{пл}} = A' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A'/J_{\text{к}}^2, \qquad (16.1)$$

где A' — постоянная, определяемая только свойствами материала и от размера вставки не зависящая; q — поперечное сечение вставки; $I_{\text{к}}$ — ток, протекающий по вставке при КЗ защищаемой цепи; $J_{\text{к}}$ — плотность тока во вставке.

После того как температура плавкой вставки достигла температуры плавления, для перехода вставки из твердого состояния в жидкое ей необходимо сообщить тепло, равное скрытой теплоте плавления.

По мере того как часть плавкой вставки из твердого состояния перейдет в жидкое, ее удельное сопротивление резко увеличится (в десятки раз). Время перехода из твердого состояния в жидкое

$$t_{\text{перех}} = \frac{\gamma L}{\rho_2 - \rho_1} \left(\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A'' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2}, \qquad (16.2)$$

где ρ_1 — удельное сопротивление материала вставки при температуре плавления; ρ_2 — удельное сопротивление материала вставки в жидком состоянии; γ — плотность материала вставки; L — скрытая теплота плавления на единицу массы материала вставки.

Значения постоянных A' и A'' для наиболее часто применяемых металлов даны в табл. 16.1. В действительности процесс плавления идет более сложно. Как только появится жидкий участок вставки, электродинамические силы, сжимающие проводник (см. гл. 1), образуют суженные участки. В этих участках возрастает плотность тока и повышается температура. Уменьшение сечения вставки создает разрывающие усилия, аналогичные силам в контактах при КЗ (§ 1.6). Таким образом, как правило, дуга загорается раньше, чем вставка полностью перейдет в жидкое состояние.

Основным параметром предохранителя при КЗ является предельный ток отключения — ток, который он может отключить при возвращающемся напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению.

Время существования дуги зависит от конструкции предохранителя. Полное время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{пл}} + t_{\text{перех}} + t_{\text{дуги}}. \qquad (16.3)$$

Для предохранителя со вставкой, находящейся в воздухе,

$$t_{\text{пр}} = \left(A' + \frac{A''}{n}\right)\frac{q^2}{I_{\text{к}}^2}\, k_0, \qquad (16.4)$$

где коэффициенты $n=3$ учитывает преждевременное разрушение вставки, а $k_0=1{,}2\div 1{,}3$ учитывает длительность горения дуги.

В предохранителях с наполнителем (закрытого типа) разрушение вставки до полного ее плавления менее вероятно. Время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = (A' + A'')\frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} + t_{\text{д}} \approx (A' + A'')\frac{q^2}{I_{\text{к}}^2}\, k_{\text{д}}. \qquad (16.5)$$

Коэффициент $k_{\text{д}}=1{,}7\div 2$ учитывает длительность горения дуги.

Плавление вставки переменного сечения происходит в перешейках с наименьшим сечением. Процесс нагрева перешейка протекает так быстро, что тепло почти не успевает отводиться на участки повышенного сечения. Наличие перешейков уменьшенного сечения позволяет резко снизить время с момента начала КЗ до появления дуги. Процесс гашения дуги начинается до момента достижения током КЗ установившегося или даже амплитудного значения. Дуга образуется через время t_1 после начала КЗ, ког-

да ток в цепи значительно меньше установившегося значения $I_{к,уст}$.

Средства дугогашения позволяют погасить дугу за миллисекунды. При этом проявляется эффект токоограничения показанный на рис. 16.2. При отключении поврежденной цепи с токоограничением облегчается гашение дуги, так как отключается не установившийся ток КЗ, а ток, определяемый временем плавления вставки.

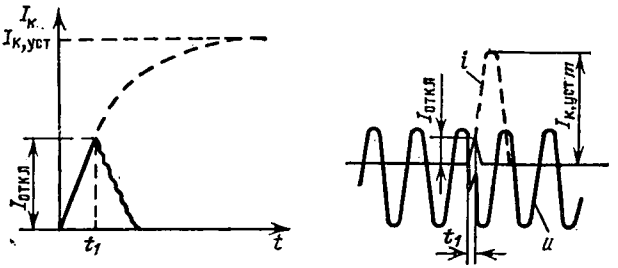


Рис. 16.2. Отключение постоянного и переменного тока предохранителем с токоограничением

С ростом номинального тока возрастает, естественно, и минимальное сечение вставки. Увеличение этого сечения приводит к возрастанию длительности плавления вставки и уменьшению эффекта токоограничения. Интенсивный отвод тепла от вставки при номинальном режиме позволяет выбрать уменьшенное сечение вставки и повысить эффект токоограничения.

16.4. КОНСТРУКЦИЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) **Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме.** Предохранители на токи от 15 до 60 А имеют упрощенную конструкцию. Плавкая вставка *1* прижимается к латунной обойме *4* колпачком *5*, который является выходным контактом (рис. 16.3, *а*). Плавкая вставка *1* штампуется из цинка, являющегося легкоплавким и стойким к коррозии материалом. Указанная форма вставки позволяет получить благоприятную времятоковую (защитную) характеристику. В предохранителях на токи более 60 А плавкая вставка *1* присоединяется к контактным ножам *2* с помощью болтов (рис. 16.3, *б*).

Вставка располагается в герметичном трубчатом патроне, который состоит из фибрового цилиндра *3*, латунной обоймы *4* и латунного колпачка *5*.

При отключении сгорают суженные перешейки плавкой вставки, после чего возникает дуга. Под действием температуры дуги фибровые стенки патрона выделяют газ, в результате чего давление в патроне за полупериода поднимается до 4—8 МПа. За счет увеличения давления поднимается вольт-амперная характеристика дуги, что способствует ее быстрому гашению (§ 4.11).

Плавкая вставка может иметь от одного до четырех сужений (рис 16.3, *в*) в зависимости от номинального напряжения. Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при КЗ и создают эффект токоограничения.

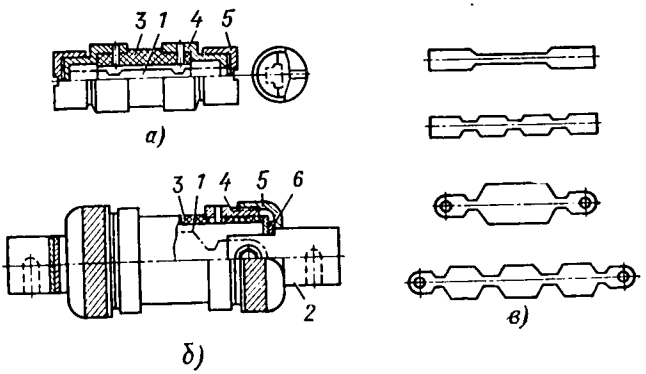


Рис. 16.3. Предохранитель типа ПР-2

Поскольку гашение дуги происходит очень быстро (0,002 с), можно считать, что уширенные части вставки в процессе гашения остаются неподвижными. Рассмотрим вставку с четырьмя перешейками. После их перегорания образуются четыре разрыва. На каждом катоде разрыва восстанавливается электрическая прочность около 200 В, а суммарная прочность предохранителей достигает 800 В. Это явление наряду с высоким давлением позволяет надежно гасить дугу при напряжении источника до 500 В.

Согласно [8.1] давление внутри патрона пропорционально квадрату тока в момент плавления вставки и может достигать больших значений. Поэтому фибровый цилиндр должен обладать высокой механической прочностью, для чего на его концах установлены латунные обоймы *4*. Диски *6*, жестко связанные с контактными ножами *2*, крепятся к обойме патрона *4* с помощью колпачков *5*.

Предохранители работают бесшумно, практически без выброса пламени и газов, что позволяет устанавливать их на близком расстоянии друг от друга.

Предохранители выпускаются двух осевых размеров — коротки и длинные. Короткие предназначены для работы на переменном напря жении не выше 380 В. Они имеют меньшую отключающую способ ность, чем длинные, рассчитанные на работу в сети с напряжение до 500 В.

В зависимости от номинального тока выпускается шесть габарито патронов различных диаметров. В патроне каждого габарита могут ус танавливаться вставки на различные номинальные токи. Так, в патрон на номинальный ток 15 А могут быть установлены вставки на ток 6, 1 и 15 А.

В табл. 16.2 приведены значения испытательных токов для предо хранителя типа ПР-2. Различают нижнее и верхнее значения испытатель ного тока. Нижнее значение испытательного тока — это максимальны

Таблица 16.2. **Испытательные токи плавких вставок**

Номинальный ток вставки, А	Длительность прохождения испытательного тока, ч	Кратность испытательного тока по отношению к номинальному	
		Нижнее значение	Верхнее значение
6, 10	1	1,5	2,1
15, 20, 25	1	1,4	1,75
35—350	1	1,3	1,6
430—1000	2	1,3	1,6

ток, который, протекая в течение 1 ч, не приводит к перегоранию предохранителя. Верхнее значение испытательного тока — это минимальный ток, который, проходя в течение 1 ч, плавит вставку предохранителя. С достаточной точностью можно принять пограничный ток равным среднеарифметическому испытательных токов.

Предохранители типа ПР-2 обладают токоограничением. Так, в цепи с током КЗ 50 000 А плавкая вставка на номинальный ток 6 А перегорает при токе всего 400 А. Однако чем больше номинальный ток, тем меньше эффект токоограничения. При номинальном токе 600 А токоограничение отсутствует, так как дуга горит весь полупериод.

Подробные данные о предохранителях этого типа приведены в [3.3].

б) **Предохранители с мелкозернистым наполнителем.** Эти предохранители более совершенны, чем предохранители ПР-2. Корпус квадратного сечения *1* предохранителя типа ПН-2 (рис. 16.4) изготавливается из прочного фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки *2* и наполнитель — кварцевый песок *3*. Плавкие

вставки привариваются к диску *4*, который крепится к пластинам *5*, связанным с ножевыми контактами *9*. Пластины *5* крепятся к корпусу винтами.

В качестве наполнителя используется кварцевый песок с содержанием SiO_2 не менее 98 %, с зернами размером $(0{,}2 \div 0{,}4) \cdot 10^{-3}$ м и влажностью не выше 3 %. Перед засыпкой песок тщательно просушивается при температуре 120—180 °С. Зерна кварцевого песка имеют высокую теплопроводность и хорошо развитую охлаждающую поверхность.

Плавкая вставка выполняется из медной ленты толщиной 0,1—0,2 мм. Для получения токоограничения вставка имеет суженные сечения

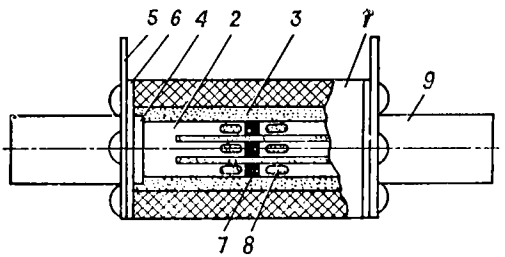


Рис. 16.4. Предохранитель типа ПН-2

8. Плавкая вставка разделена на три параллельных ветви для более полного использования наполнителя. Применение тонкой ленты, эффективный теплоотвод от суженных участков позволяют выбрать небольшое минимальное сечение вставки для данного номинального тока, что обеспечивает высокую токоограничивающую способность. Соединение нескольких суженных участков последовательно способствует замедлению роста тока после плавления вставки, так как возрастает напряжение на дуге предохранителя. Для снижения температуры плавления на вставки наносятся оловянные полоски *7* (металлургический эффект).

При КЗ плавкая вставка сгорает и дуга горит в канале, образованном зернами наполнителя. Из-за горения в узкой щели при токах выше 100 А дуга имеет возрастающую вольт-амперную характеристику. Градиент напряжения на дуге очень высок и достигает $(2 \div 6) \cdot 10^4$ В/м. Этим обеспечивается гашение дуги за несколько миллисекунд.

После срабатывания предохранителя плавкие вставки вместе с диском *4* заменяются, после чего патрон засыпается песком. Для герметизации патрона под пластины *5* кладется асбестовая прокладка *6*, что одновременно предохраняет песок от увлажнения. При номинальном токе 40 А и ниже предохранитель имеет более простую конструкцию.

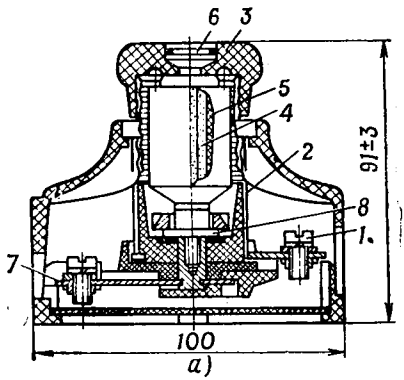
Предохранители ПН-2 выпускаются на номинальный ток до 630 А. Предельный отключаемый ток КЗ, который может отключаться предо-

хранителем, достигает 50 кА (действующее значение тока металлического КЗ сети, в которой устанавливается предохранитель).

Малые габариты, незначительная затрата дефицитных материалов, высокая токоограничивающая способность являются достоинствами этого предохранителя. Более подробные сведения о предохранителях ПН-2 приведены в [3.3].

В малогабаритных распределительных устройствах применяются резьбовые предохранители типа ПРС (рис. 16.5, *а*). Один конец цепи подводится к контакту *1*, который связан с контактной гильзой *2*, соединенной резьбой с контактом съемной головки *3*. Плавкая вставка *4* располагается в фарфоровом цилиндре *5*, заполненном кварцевым песком. На торцах цилиндра *5* укреплены контактные колпачки, с которыми соединена плавкая вставка *4*. Второй конец цепи через контакт *7* соединяется с контактным винтом *8*. Предохранитель имеет указатель срабатывания. При сгорании плавкой вставки освобождается специальная пружина, которая выбрасывает глазок в застекленное отверстие *6*. После срабатывания предохранителя заменяется цилиндр *5* со сгоревшей плавкой вставкой и сигнализирующим устройством.

Предохранители этого типа выпускаются на токи до 100 А, напря-



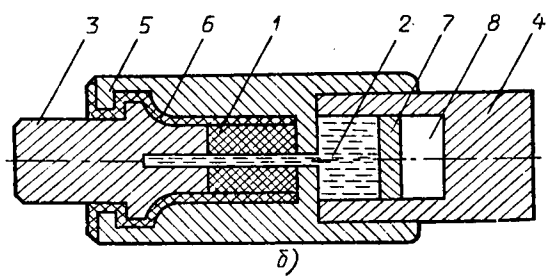


Рис. 16.5. Предохранитель типа ПРС (*а*), жидкометаллический предохранитель (*б*)

жение до 440 В постоянного тока и до 500 В переменного тока частотой 50 Гц. Предельно отключаемый ток составляет 60 кА.

Эти предохранители более сложны в производстве и более дороги, чем предохранители ПН-2. Поэтому их применение целесообразно при малых габаритах распределительного устройства и ограниченном времени обслуживания (после сгорания плавкой вставки).

в) **Предохранители с жидкометаллическим контактом.** В таком предохранителе (рис. 16.5, *б*) электроизоляционная трубка *1* имеет капилляр, заполненный жидким металлом *2*. Капилляр с жидким металлом герметично закрыт электродами *3*, *4* и корпусом *5* с уплотнением *6* и имеет специальное демпфирующее устройство *7*, *8*. При протекании большого тока жидкий металл в нем испаряется, образуется паровая пробка и электрическая цепь размыкается. После определенного времени пары металла конденсируются и контакт восстанавливается. Предельный отключаемый ток таких предохранителей достигает 250 кА при напряжении 450 В переменного тока. Предохранители работают многократно с большим токоограничением.

г) **Быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов.** Малая тепловая инерция, быстрый прогрев полупроводникового перехода крайне затрудняют защиту мощных диодов, тиристоров и транзисторов при токовых перегрузках. Обычные типы предохранителей и автоматических выключателей из-за относительно большого времени срабатывания не обеспечивают защиту полупроводниковых приборов при КЗ. Для выполнения этой задачи разработаны специальные быстродействующие предохранители.

При времени протекания тока $t<0{,}02$ с можно считать, что процесс нагрева прибора протекает по адиабатическому закону. Для удобства согласования характеристик прибора и предохранителя вводится понятие интеграла Джоуля $G=\int_{t}^{0} i^2 dt$, где t — длительность протекания тока через прибор.

Для эффективной защиты необходимо, чтобы полный джоулев интеграл предохранителя был меньше джоулева интеграла защищаемого прибора. Джоулев интеграл предохранителя состоит из джоулева интеграла нагрева до температуры плавления вставки $G_{пл}$ и джоулева интеграла гашения образовавшейся дуги $G_{гаш}$. С целью сокращения первой составляющей предохранитель должен работать с большим токоограничением. Для достижения этой цели плавкая вставка выполняется из серебра, имеет перешеек с минимальным сечением и охлаждается кварцевым наполнителем.

С целью улучшения охлаждения при больших номинальных токах плавкая вставка выполняется из ленты толщиной 0,05—0,2 мм. При больших токах вставка имеет несколько параллельных ветвей. Помога-

ет также заполнение кварцевым песком под большим давлением. В некоторых случаях для дальнейшего уменьшения перешейка предохранитель имеет искусственное водяное охлаждение.

Для уменьшения времени горения дуги плавкая вставка имеет большое число перешейков. После плавления вставки образуется ряд последовательно включенных дуг, благодаря чему вольт-амперная характеристика предохранителя поднимается. Число перешейков ограничивается перенапряжением, которое возникает при отключении цепи.

При постоянном токе гашение дуги осложняется тем, что ток не проходит через нуль и вся электромагнитная энергия отключаемой цепи рассеивается в предохранителе. Решающим фактором при постоянном токе является постоянная времени цепи $T=L/R$. С увеличением постоянной времени T условия работы предохранителя утяжеляются. Необходимо выбирать предохранитель на более высокое номинальное напряжение, чем при переменном токе. Время плавления вставки при постоянном токе [16.2]

$$t_{\text{пл}}=\sqrt[3]{3Бq_0^2\left(\frac{T}{I_{\text{к,уст}}}\right)^2},$$

при переменном токе

$$t_{\text{пл}}=\sqrt[3]{3Бq_0^2/\left(\omega I_{\text{к,уст}}^2\right)},$$

где $Б$ — постоянная, зависящая от удельной теплоты плавления и испарения материала. Для серебра $Б=8\cdot10^4$ А^2·с/мм^4, для меди $Б=10^5$ А^2·с/мм^4, для алюминия $3{,}4\cdot10^4$ А^2·с/мм^2; q_0 — сечение перешейка, мм^2; T — постоянная времени цепи, с; $I_{\text{к,уст}}$ — установившееся значение тока КЗ цепи.

При $f\geqslant50$ Гц и $T\geqslant2$ мс время плавления на постоянном токе больше, чем на переменном. Максимальный пропускаемый предохранителем постоянный ток

$$i_0=\sqrt[3]{\frac{3Бq_0^2I_{\text{к,уст}}}{T}}.$$

Обычно предохранители рассчитывают для работы в цепях с постоянной времени $T\leqslant35$ мс.

Конструктивно быстродействующий предохранитель представляет собой корпус из прочного фарфора, внутри которого расположены плавкие вставки и кварцевый песок. Контакты укрепляются к корпусу винтами и могут иметь различное исполнение.

В современных преобразовательных установках каждый полупроводниковый прибор имеет предохранитель. Токи, протекающие через

предохранитель, могут достигать 100—200 кА. При разрушении предохранителя может произойти авария преобразовательной установки. В связи с этим быстродействующие предохранители должны иметь большую механическую прочность и обладать высокой надежностью.

В СССР выпускается серия быстродействующих предохранителей ПП-57 на номинальные токи 40—800 А и готовится к выпуску серия ПП-59 на номинальные токи 250—2000 А. Номинальные напряжения составляют до 1250 В переменного и до 1050 В постоянного тока. Предохранитель ПП-59 на ток 400 А и напряжение 660 В имеет джоулев интеграл отключения $320 \cdot 10^3$ $А^2 \cdot с$. Подробные данные о быстродействующих предохранителях приведены в [3.1, 16.2].

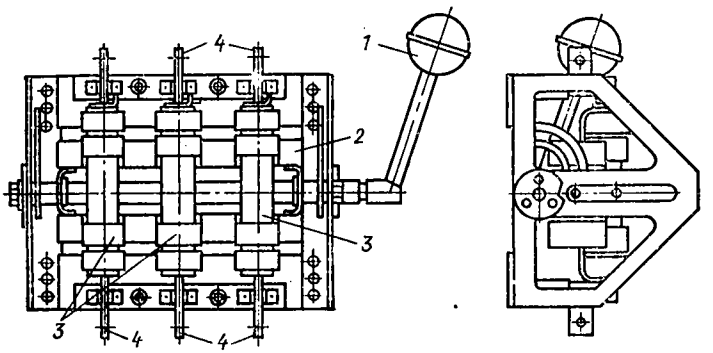


Рис. 16.6. Блок предохранитель — выключатель

Быстродействующие предохранители предназначены только для защиты от КЗ. Защита от перегрузок должна выполняться другими аппаратами.

д) **Блоки предохранитель — выключатель.** Для уменьшения габаритных размеров распредустройства выпускаются блоки предохранитель — выключатель (БПВ), обеспечивающие отключение номинальных токов и защиту цепей от токовых перегрузок и КЗ. В БПВ (рис. 16.6) при вращении рукоятки *1* траверса *2* с установленными на ней предохранителями *3* перемещается и контакты *4* аппарата размыкаются. Наличие двух разрывов на полюс обеспечивает отключение номинальных токов до 350 А при переменном напряжении до 550 В. Для отключения номинального постоянного тока 350 А при напряжении до 440 В разрывы снабжаются дугогасительными деионными решетками.

Съем патрона с перегоревшей вставкой возможен только в отклю-

ченном положении БПВ после освобождения специальной защелки. Электрическая износостойкость аппарата 2500, механическая — 5000 циклов.

16.5. ВЫБОР ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

а) **Выбор по условиям длительной эксплуатации и пуска.** В процессе длительной эксплуатации температура нагрева предохранителя не должна превосходить допустимых значений. В этом случае обеспечивается стабильность времятоковых характеристик предохранителя. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы патрон и плавкая вставка выбирались на номинальный ток, равный или несколько больший номинального тока защищаемой установки.

Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Так, пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может достигать $7I_{ном}$. По мере разгона пусковой ток падает до значения, равного номинальному току двигателя. Длительность пуска зависит от характера нагрузки. Например, для привода металлорежущих станков с относительно небольшой инерцией механизма время разгона двигателя составляет 1 с. Процесс разгона центрифуги происходит значительно медленней из-за большой инерции механизма, и длительность пуска может достигать 10 с и более. Предохранитель должен не перегорать при воздействии пусковых токов, а в плавких вставках не должно происходить старения под действием этих токов. Экспериментально установлено, что старение плавкой вставки не происходит при токах, равных половине тока плавления. Согласно рис. 16.7 вставка предохранителя ПН-2 при времени 1 с плавится при токе, равном $5I_{ном}$. Вследствие производственных допусков времятоковая характеристика имеет разброс (штриховые кривые). Если пуск длится 1 с, то среднее значение пускового тока за этот период должно быть не более 0,5 тока плавления вставки за это же время. Таким образом, пусковой ток $I_п$ связан с током вставки соотношением $I_п = 0{,}5I_{пл} = 0{,}5 \cdot 5I_{в,ном}$ и, следовательно,

$$I_{в,ном} = 0{,}4I_п,$$

т. е. номинальный ток вставки выбирается по пусковому току нагрузки.

Для тяжелых условий пуска, когда двигатель медленно

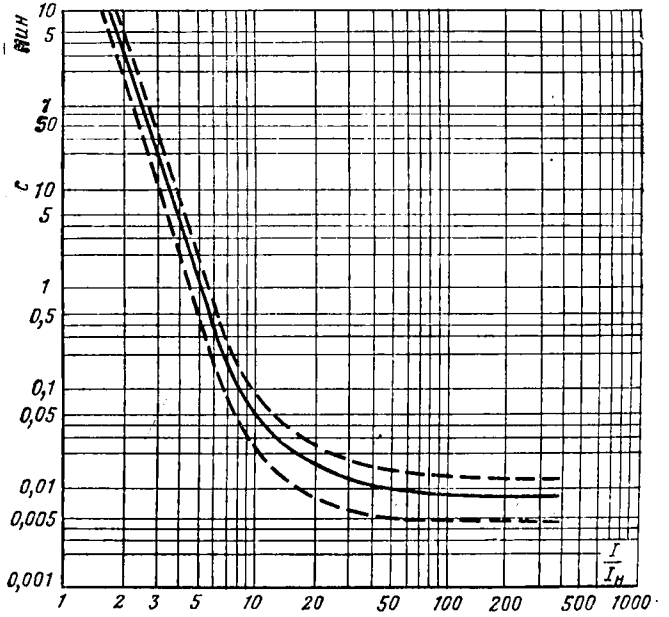


Рис. 16.7. Времятоковая характеристика предохранителя ПН-2

разворачивается (привод центрифуги), или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски происходят с большой частотой, вставки выбирают с еще большим запасом: $I_{в,ном} = (0{,}5 \div 0{,}6) I_п$. Если предохранитель стоит в линии, питающей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по формуле

$$I_{в,ном} = 0{,}4\,[I_р + (I_п - I_{ном,дв})],$$

где $I_р$ — расчетный номинальный ток линии, равный $\Sigma I_{ном,дв}$. Разность $I_п - I_{ном,дв}$ берется для двигателя, у которого она наибольшая.

Для двигателя с фазным ротором, если $I_п \leqslant 2 I_{ном,дв}$, плавкую вставку можно выбирать по условию $I_{в,ном} \geqslant (1 \div 1{,}25) I_{ном,дв}$. Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, за номинальный принимается ток в режиме ПВ = 25 % (§ 9.7).

Наряду с проверкой вставки по условиям пуска или кратковременной перегрузки необходимо проводить проверку по условиям КЗ. При $I_к / I_{в,ном} \geqslant 10 \div 15$ время пере-

горания вставки не превышает 0,15—0,2 с, и на этом времени мало сказывается разброс характеристик вставок. При таком времени сваривание контактов контактора или магнитного пускателя маловероятно. Однако это требование часто не удается соблюсти, так как кратность $I_к/I_{в,ном}$ определяется мощностью питающего трансформатора и сопротивлением токопроводящих проводов и кабелей. Допускается применение предохранителей при кратностях $I_к/I_{в,ном} \geqslant 3 \div 4$. При такой кратности время отключения может достигать 15 с, что создает опасность для обслуживающего персонала, так как при этой кратности напряжение прикосновения может оказаться опасно большим. При такой низкой кратности $I_к/I_{в,ном}$ нагрев провода при небольших перегрузках (1,6—2) может быть очень большим и может приводить к выгоранию изоляции [16.3]. Поэтому установка плавких вставок с большим запасом может допускаться только в крайних случаях, когда выгорание изоляции проводников не грозит пожаром (провода уложены в стальных трубах и имеют огнестойкую изоляцию).

В заключение следует указать, что номинальное напряжение предохранителя $U_{ном,пр}$ должно быть равно номинальному напряжению сети $U_{ном,с}$.

В качестве примера рассмотрим выбор предохранителей для ряда двигателей, питающихся от общего распределительного щита РЩ (рис. 16.8). Один из вариантов параметров двигателей дан в табл. 16.3 [9.4].

Таблица 16.3. **Параметры двигателей схемы**

Обозначение на схеме	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальный ток, А	Кратность пускового тока	Пусковой ток, А	Номинальный ток плавкой вставки, А		Номинальный ток предохранителя, А
						расчетный	выбранный	
М1	А32-2	1,7	3,7	6	22,2	8,9	10	15
М2	А41-2	2,8	5,8	5,5	31,9	12,8	15	15
М3	А62-2	20	38	6	228	91,2	100	200
М4	А51-4	4,5	9,4	6	56,5	22,6	25	60
М5	А62-6	10	21,5	4,5	96,8	38,7	60	60

Выбор плавкой вставки для каждого предохранителя проводится, как указывалось выше. Если условия пуска легкие, то для предохранителя *FU1*

$$I_{в,ном FU1} = 0{,}4 I_п = 0{,}4 \cdot 22{,}2 = 8{,}9 \text{ А}.$$

Принимаем вставку с номинальным током 10 А,

Аналогично находятся номинальные токи вставок *FU2—FU5*.

По условиям задачи во включенном состоянии могут одновременно находиться четыре двигателя. Если производится пуск, то могут запускаться сразу два двигателя. Для длительного режима

$$I_{\text{в.ном}FU6} \geqslant I_{\text{ном}M1} + I_{\text{ном}M3} + I_{\text{ном}M4} + I_{\text{ном}M5}.$$

Самый тяжелый случай одновременного пуска двигателей *M3* и *M5*

$$I_{\text{в,ном}FU6} \geqslant 0{,}4\,[\Sigma I_{\text{ном,дв}} + (I_{\text{п}} - I_{\text{ном,дв}})'],$$

где $\Sigma I_{\text{ном,дв}}$ — сумма номинальных токов всех двигателей; $I_{\text{п}}$ — пусковой ток запускаемого двигателя; $(I_{\text{п}} - I_{\text{ном,дв}})'$ — разность между пусковым током запускаемого двигателя и номинальным током;

$$I_{\text{в,ном}FU6} \geqslant 0{,}4\,\{74{,}7 + [(228 - 38) + (96{,}8 - 21{,}5)]\} = 136 \text{ А}.$$

Можно принять вставку на 160 А.

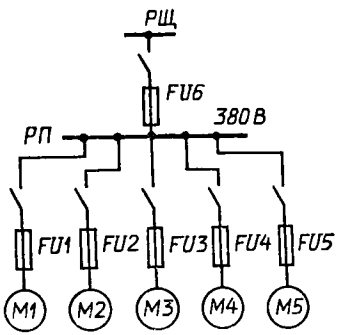


Рис. 16.8. Схема защиты плавкими предохранителями группы короткозамкнутых асинхронных двигателей

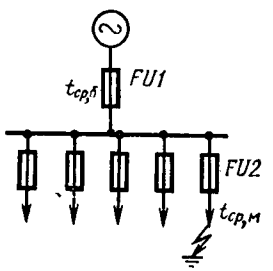


Рис. 16.9. К расчету селективности предохранителей

Выбранные предохранители надо проверить на КЗ непосредственно у двигателя. Берется двухфазное КЗ при изолированной нейтрали и однофазное КЗ на землю, если нейтраль заземлена. Для правильной работы необходимо, чтобы

$$I_{\text{к}}/I_{\text{в,ном}} \geqslant 3 \div 4,$$

где $I_{\text{к}}$ — ток КЗ у двигателя; $I_{\text{в,ном}}$ — номинальный ток плавкой вставки у двигателя.

Значение $I_{\text{к}}$ зависит от активного и реактивного сопротивления источника питания (трансформатора) и питающих линий. Для двухфазного КЗ $I_{\text{к}(2)} = U_{\text{ном}}/(2Z_{\text{ф}})$, для однофазного КЗ $I_{\text{к}(1)} = U_{\text{ном}}/\sqrt{3}\,Z_{\text{фо}}$ и для трехфазного КЗ $I_{\text{к}(3)} = U_{\text{ном}}/\sqrt{3}Z_{\text{ф}}$.

Сопротивления фаз $Z_ф$ и $Z_{ф0}$ определяются уравнениями

$$Z_ф = \sqrt{(\Sigma R_ф + R_т)^2 + (\Sigma X_ф + X_т)^2};$$

$$Z_{ф0} \approx \sqrt{(\Sigma R_ф + R_{ф0})^2 + (\Sigma X_ф + X_{ф0})^2} + Z_{т1},$$

где $R_ф$, $X_ф$ — активное и индуктивное сопротивления проводников фазы; $R_{ф0}$, $X_{ф0}$ — то же нулевого провода; $R_т$, $X_т$ — то же фазы трансформатора; $Z_{т1}$ — полное расчетное сопротивление трансформатора при замыкании на землю [9.4].

Выбранные предохранители проверяют на кратность тока КЗ и отключающую способность. Так, например, при КЗ на землю у двигателя *M5*

$$I_{к(1)} = U_{ном}/\sqrt{3}\,Z_{ф0}.$$

Согласно [9.4] $Z_{ф0}=0{,}851$ Ом, тогда

$$I_к = 380/\sqrt{3}\cdot 0{,}851 = 258 \text{ А}; I_к/I_{в.ном} = 258/60 = 4{,}3.$$

Предельный ток отключения предохранителя ПР2-60 равен 3500 А.

Полученное отношение больше трех, что необходимо для надежной работы предохранителей. Наибольший ток должен отключать предохранитель *FU6* при КЗ на распределительной панели РП

$$I_{к(3)} = U_{ном}/\sqrt{3}\,Z_ф.$$

Сопротивление $Z_ф$ включает сопротивление силового трансформатора $Z_т$ и сопротивление линии $Z_л$ от щита РЩ до РП.

б) **Выбор предохранителей по условию селективности.** Между источником энергии и потребителем обычно устанавливается несколько предохранителей (рис. 16.9), которые должны отключать поврежденные участки по возможности селективно.

Предохранитель *FU1*, пропускающий больший номинальный ток, имеет вставку большего сечения, чем предохранитель *FU2*, установленный у одного из потребителей. При КЗ необходимо, чтобы повреждение отключалось предохранителем, расположенным у места повреждения. Все остальные предохранители, расположенные ближе к источнику, должны остаться работоспособными. Такая согласованность работы предохранителей называется избирательностью или селективностью.

Для обеспечения селективности полное время $t_{р2}$ работы предохранителя *FU2* должно быть меньше времени нагрева предохранителя *FU1* до температуры плавления его вставки, т. е.

$$t_{пл1} \geqslant t_{р2}.$$

Из (16.1), (16.5) можно получить для предохранителей закрытого типа (ПН-2)

$$A' \frac{q_1^2}{I_к^2} > (A_2' + A_2'') \frac{q_2^2}{I_к^2} k_д.$$

После простейших преобразований получим условие селективности для предохранителей с гашением дуги в закрытом объеме

$$\frac{q_1}{q_2} > \sqrt{\frac{A_2' + A_2''}{A_1'} k_д}.$$

Для закрытых предохранителей с мелкозернистым наполнителем и медной вставкой селективность соблюдается при $q_1/q_2 > 1{,}55$. Указанные соотношения справедливы и для случая токоограничивающих предохранителей, когда ток КЗ длится только долю полупериода.

Рассмотренный расчет носит приближенный характер, так как не учитывает конкретные характеристики данной конструкции предохранителя и отклонения реальных характеристик от номинальных из-за производственных допусков.

Для обеспечения селективности наименьшее фактическое время срабатывания предохранителя *FU1* (на больший ток) должно быть больше наибольшего времени срабатывания предохранителя *FU2* (на меньший номинальный ток):

$$t_{ср,б} > t_{ср,м},$$

где $t_{ср,б}$, $t_{ср,м}$ — времена срабатывания предохранителя на больший и меньший номинальные токи, соответствующие номинальной характеристике.

Время срабатывания предохранителя из-за производственных допусков может отклоняться от номинального на ± 50 %. Тогда приведенное неравенство можно записать в виде

$$0{,}5 t_{ср,б} > 1{,}5 t_{ср,м}.$$

Множители 0,5 и 1,5 учитывают, что предохранитель *FU1* взят с отрицательным допуском по времени срабатывания, а предохранитель *FU2* — с положительным. В результате получим необходимое условие селективности

$$t_{ср,б} > 3 t_{ср,м}, \qquad (16.6)$$

т. е. для селективной работы время срабатывания предо хранителя на больший ток должно быть в 3 раза больше чем у предохранителя на меньший ток.

Неравенство (16.6) учитывает крайний случай, когда время работы предохранителя на больший номинальный ток имеет наименьшее значение, а у предохранителя на меньший номинальный ток — наибольшее значение. На основании (16.6) составлена табл. 16.4. Для данной вставки

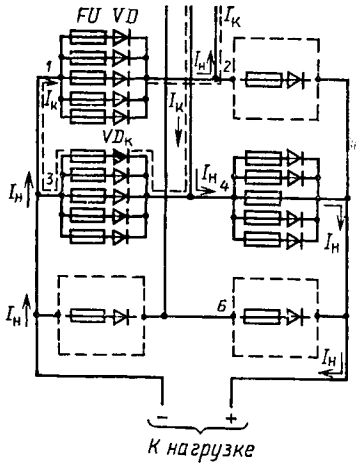
Таблица 16.4. **Номинальный ток вставки большего сечения предохранителя ПН-2, требующийся для строгого обеспечения селективности**

Номинальный ток вставки меньшего сечения предохранителя ПН-2, А	Номинальный ток вставки большего сечения, А, при кратности тока КЗ по отношению к номинальному току вставки меньшего сечения $I_к/I_{ном,м}$				
	10	20	50	100	150 и более
30	50	60	120	150	200
40	60	80	120	200	200
50	80	100	120	250	250
60	100	120	150	250	250
80	120	120	200	250	250
100	120	120—150	250	250	250
120	150	200	300	300	300
150	200	250	300	300	300
200	250	300	400	400	400
250	300	400	600	600	600
300	400	500	600	—	—
400	500	600	—	—	—

с током $I_{ном,м}$ вставка на больший ток берется в зависимости от кратности тока. Так, при $I_к/I_{ном,м}=10$ при токе $I_{ном,м}=30$ А вставка предохранителя на больший ток должна быть выбрана на 50 А.

Если нарушение селективности не ведет к серьезным нарушениям работы защищаемой установки, то при выборе вставок отклонение характеристик предохранителей от номинальных можно принимать ± 25 %.

в) **Выбор быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых приборов.** 1. Полный джоулев интеграл при отключении предохранителя $(I^2t)_{откл,пред}$ должен быть меньше допустимого джоулева интеграла полупроводникового прибора $(I^2t)_{приб}$. На рис. 16.10 представлена схема мощной выпрямительной установки. В каждом плече моста установлено по пять диодов, каждый из которых защищен предохранителем *FU*. При пробое диода $VD_к$ ток КЗ $I_к$, обозначенный пунктиром, замыкается через $VD_к$ в обратном направлении и закорачи-



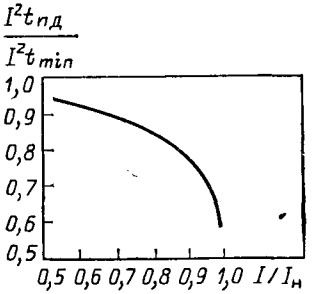


Рис. 16.11. Зависимость преддуговых интегралов от тока предварительной нагрузки

Рис. 16.10. Защита полупроводниковых диодов в мощной выпрямительной схеме

вает две фазы. Предохранитель *FU* срабатывает, поврежденный диод отключается, и схема продолжает нормальную работу с некоторой перегрузкой диодов. Для защиты диодов должно соблюдаться условие

$$(I^2t)_{\text{отк,пред}} \leqslant [n(1-c)+c]^2 (I^2t)_{\text{приб}},$$

где n — число параллельных ветвей преобразователя; c — коэффициент неравномерности деления тока по ветвям. При равномерном распределении тока $c=0$ и $(I^2t)_{\text{отк,пред}} \leqslant n^2 (I^2t)_{\text{приб}}$. Значение $(I^2t)_{\text{приб}}$ для прибора берется из каталога или (при синусоидальном токе) по уравнению

$$(I^2t)_{\text{приб}} = I_m^2 T/4,$$

где I_m — допустимое значение ударного неповторяющегося тока в прямом направлении; T — период переменного тока.

2. Наибольшее значение тока, протекающего через предохранитель, должно быть

$$i_0 \leqslant [n(1-c)+c]\, I_m.$$

3. При срабатывании предохранителя в поврежденной ветви характеристики предохранителей в неповрежденных ветвях не должны изменяться

$$(I^2t)_{\text{отк,пред}} \leqslant [n(1-c)+c]^2 (I^2t)_{\text{пд,пред}},$$

где $(I^2t)_{\text{пд,пред}}$ — преддуговой джоулев интеграл предохранителя (инте-

грал плавления) в неповрежденных ветвях. Наименьшее значение пред дугового интеграла можно найти по формуле

$$I^2 t_{min} = Б^2 q_0.$$

4. Джоулев интеграл предохранителя зависит от напряжения

$$(I^2 t)_{\text{отк,пред}} = I^2 t_{min} \left[1 + a\left(\frac{U}{U_{\text{ном}}}\right)\right]^b.$$

Значения $I^2 t_{min}$, a, b даются в технических условиях на поставку предо хранителей. Для предохранителя ПП-68 $a=4{,}56$; $b=0{,}8$; $I^2 t_{min} = 3{,}8 \cdot 10^4$ А^2·с.

5. Значение джоулевого интеграла для предохранителя зависит о коэффициента мощности цепи $\cos\varphi$. В технических условиях данны предохранителей приводятся для $\cos\varphi=0{,}1$. С повышением $\cos\varphi$ джоу лев интеграл уменьшается из-за облегчения условий гашения дуги. По опытным данным, при $\cos\varphi=0{,}95$ джоулев интеграл уменьшается на 57 %.

6. Мгновенное значение тока, при котором начинается токоограничение,

$$i_0 = \sqrt[3]{3\omega\sqrt{2}\, I Б q_0},$$

где ω — частота переменного тока; I — действующее значение периодической составляющей отключаемого тока; $Б$ и q_0 — см. стр. 516

Преддуговой интеграл предохранителя зависит от тока, который протекал до начала КЗ ($I_{\text{нач}}$). Для предохранителя ПП-58 эта зависимость представлена на рис. 16.11, где $I^2 t_{\text{пд}}$ — преддуговой интеграл при токе нагрузки I; $I^2 t_{min}$ — джоулев интеграл, указываемый для предохранителя ($I_{\text{нач}}=0$).

16.6. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

а) **Назначение, предъявляемые требования.** При напряжении выше 3 кВ и частоте 50 Гц применяются высоковольтные предохранители. Процесс нагрева плавкой вставки в высоковольтных предохранителях протекает так же, как и в предохранителях низкого напряжения.

В отношении времени плавления к высоковольтным предохранителям предъявляется следующее общее требование: длительность плавления вставки должна быть менее 2 ч при токе перегрузки, равном $2I_{\text{ном}}$, и более 1 ч при токе перегрузки, равном $1{,}3\, I_{\text{ном}}$.

Высоковольтные предохранители часто применяются для защиты трансформаторов напряжения от КЗ (§ 23.1). Ток, текущий через предохранитель в номинальном режиме, не

ревышает доли ампера. В таких предохранителях время лавления вставки равно 1 мин при токе 1,25—2,5 А.

В связи с высоким значением восстанавливающегося напряжения процесс гашения дуги усложняется. В связи этим изменяются габаритные размеры и конструкция высоковольтных предохранителей. Наибольшее распространение получили предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.

б) **Предохранители с мелкозернистым наполнителем.** Размер зерен материал такие же, как и в низковольтных предохранителях. Длина лавкой вставки, м, таких предохранителей может быть определена по мпирической формуле [18.2]

$$l = 0{,}16 + 0{,}07U_{\text{ном}},$$

де $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение предохранителя, кВ.

Для эффективного гашения дуги плавкая вставка берется малого диаметра.

Предохранители типа ПК на напряжение 6—10 кВ (рис. 16.12, *а*) содержат фарфоровый цилиндр *1*, армированный по торцам латунными колпаками *2*. Наполнитель *7* в виде песка засыпается через отверстие в колпаке, которое после засыпки запаивается крышкой *3*. В предохранителях на ток до 7,5 А медная плавкая вставка *5* наматывается на керамический рифленый каркас *4*. Это позволяет увеличить длину плавкой вставки и эффект токоограничения, а следовательно, повысить отключаемый ток. Однако при перегрузках, меньших $3\ I_{\text{ном}}$, возможно образование токопроводящего канала из материала каркаса и расплавившейся вставки. В результате наступает тепловое разрушение предохранителя. Поэтому предохранители с каркасом следует применять только для защиты от КЗ.

При номинальных токах, превышающих 7,5 А, плавкая вставка выполняется в виде параллельных спиралей (рис. 16.12, *б*). Применение параллельных вставок позволяет увеличить номинальный ток до 100 А при $U_{\text{ном}}$=3 кВ. При напряжении 10 кВ номинальный ток предохранителя равен 50 А. При токе 200 А приходится устанавливать четыре параллельных предохранителя. Применение параллельных вставок позволяет изготавливать их из медной или серебряной проволоки малого диаметра и сохранять эффект узкой щели в процессе дугогашения. Для снижения температуры предохранителя при небольших длительных перегрузках плавкие вставки имеют оловянные шарики *6*.

Предохранитель имеет указатель срабатывания *9*. На указатель *9* действует пружина, которая удерживается во втянутом состоянии специальной плавкой вставкой *8*. Эта вставка перегорает после перегорания основных вставок *5*. При этом указатель освобождается и выбрасывается в положение *9′* с силой, определяемой пружиной. Этот

указатель можно использовать для автоматического отключения выключ чателя нагрузки после отключения КЗ предохранителем (§ 18.10 Указатель *9* может быть использован также в предохранителях с авто матическим повторным включением. В этом случае срабатывание указа теля в первом предохранителе ведет к параллельному подключени к нему другого предохранителя с исправной плавкой вставкой.

При КЗ плавкая вставка испаряется по всей длине и в цепь вводит ся длинная дуга, горящая в у кой щели и имеющая высокое со противление, особенно в начал ной стадии, когда пары металл недостаточно ионизированы. Вс это приводит к возникновени больших перенапряжений — д $4{,}5U_{ном}$ на контактах предохра нителя. Для ограничения пере напряжений применяются встав ки переменного сечения. Вначал сгорает участок меньшего сече ния, а затем большего. В ре зультате длина дуги растет мед ленней.

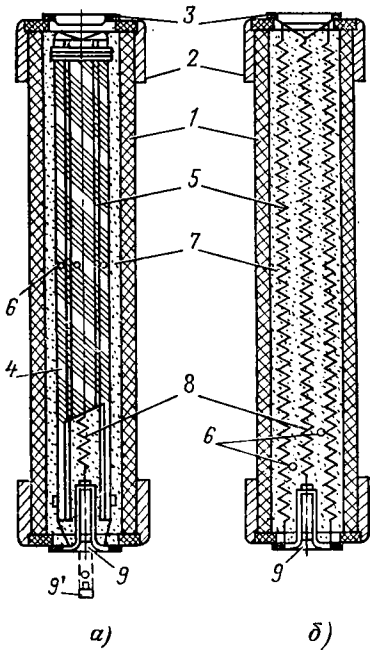


Рис. 16.12. Предохранитель типа ПК

Предохранители с мелкозер нистым наполнителем обладают токоограничением, особенно при больших токах КЗ. В длительном режиме интенсивное охлаждение тонких плавких вставок позволя ет выполнять их с минимальным сечением и снизить ток плавления. С ростом номинального тока эффект токоограничения падает. Номинальный ток отключения предохранителей достигает 20 кА при напряжении до 10 кВ.

Предохранители серии ПКТН на напряжение до 35 кВ имеют внутри керамический каркас с тонкой плавкой вставкой. Так как номинальный ток вставок менее 1 А, то их сечение мало и токоограничивающий эффект особенно велик. Плавкая вставка выполняется из константановой проволоки с четырехступенчатым сечением для ограничения перенапряжений. Плавление вставки происходит последовательно по ступеням. Предохранитель обеспечивает защиту высоковольтных шин от повреждения трансформатора напряжения при любой мощности источника питания (ток ограничивается предохранителем).

Предохранители серий ПК и ПКТН работают бесшумно, без выброса пламени и раскаленных газов.

Для нормальной работы предохранителей особо важное значение имеет герметизация. При проникновении влаги в предохранитель он теряет свойство дугогашения. Поэтому места пайки и цементирующая замазка, крепящая колпачки, окрашиваются специальной влагозащитной эмалью. Перезарядка предохранителя в эксплуатации не допускается.

Как правило, установки напряжением 35 кВ и выше работают на открытом воздухе и подвержены воздействию атмосферы. В этих условиях трудно обеспечить надежную работу предохранителя ПК из-за увлажнения наполнителя. Характеристики кварцевых предохранителей

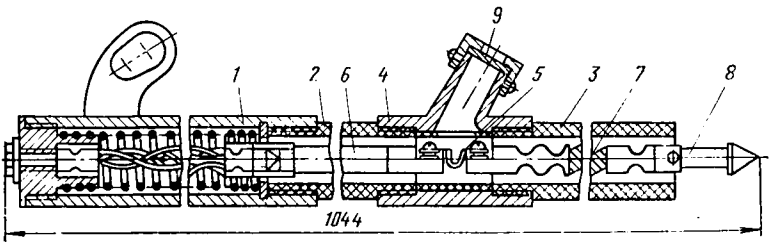


Рис. 16.13. Патрон стреляющего предохранителя типа ПСН-35

высокого напряжения приведены в [3.1]. Перспективы дальнейшего развития предохранителей на напряжение выше 35 кВ осложняются технологическими трудностями изготовления и ростом их габаритов.

в) **Стреляющие предохранители.** Для работы на открытом воздухе при напряжении 10 и 35 кВ и отключаемом токе до 15 кА применяются так называемые стреляющие предохранители типов ПСН-10 и ПСН-35. На рис. 16.13 показан патрон предохранителя ПСН-35. В корпусе *1* установлены две винипластовые трубки *2* и *3*, соединенные стальным патрубком *4*. Плавкая вставка *5* присоединяется к токоведущему стержню *6* и гибкому проводнику *7*, соединенному с наконечником *8*. Патрон, установленный на изоляторах, показан на рис. 16.14. Изоляторы *1* крепятся к стальному цоколю *2*. Цепь присоединяется к выводам *3* и *4*. Вращающийся контакт *5* действует на наконечник *8* (рис. 16.13) и с помощью своей пружины стремится вытащить гибкий проводник *7* из трубки *3*. При перегорании плавкой вставки образуется дуга, которая, соприкасаясь со стенками трубки, разлагает их, и образующийся газ поднимает давление в трубке. При вытягивании наконечника из трубки длина дуги увеличивается, давление возрастает. При больших токах мембрана *9* в патрубке *4* разрывается и дуга гасится поперечным дутьем. Если ток невелик, то дуга гасится продольным потоком газа, кото-

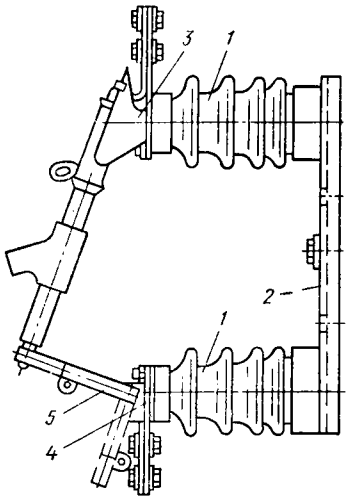


Рис. 16.14. Предохранитель типа ПСН-35

рый вырывается из трубки после выброса гибкого контакта 7 из трубки. Длительность горения падает при увеличении тока. При больших токах дуга гаснет за 0,04 с. При малых токах (800—1000 А) время горения возрастает до 0,3 с.

Процесс отключения сопровождается сильным выбросом пламени, газов и стреляющим звуковым эффектом. Поэтому стреляющие предохранители соседних фаз должны быть на значительном удалении друг от друга.

В процессе гашения дуга сначала имеет небольшую длину, а затем длина ее увеличивается по мере выброса гибкого проводника. Это ограничивает скорость роста сопротивления дугового промежутка и устраняет перенапряжения.

г) **Выбор предохранителей.** При определении номинального тока вставки необходимо исходить из условия максимальной длительной перегрузки.

Очень часто обмотка высшего напряжения трансформатора присоединяется через предохранитель. При подаче напряжения на трансформатор возникают пики намагничивающего тока, среднее значение амплитуды которых достигает 10 $I_{ном}$, а длительность прохождения примерно равна 0,1 с. Выбранный по номинальному току предохранитель должен быть проверен на прохождение в течение 0,1 с начального намагничивающего тока.

В заключение необходимо проверить селективность работы предохранителя с выключателями, установленными на стороне высокого и низкого напряжения.

При КЗ в самом трансформаторе время отключения предохранителя должно быть меньше, чем выдержка времени выключателя, установленного на стороне высокого напряжения и ближайшего к предохранителю. При КЗ на стороне низкого напряжения предохранитель должен иметь время плавления больше, чем уставка защиты выключателей на стороне низкого напряжения. При выборе предохранителя необходимо соблюсти также соотношение $U_{ном,пред} = U_{ном,уст}$; $I_{отк,пред} \geqslant I_{к,уст}$.

Глава семнадцатая

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

17.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) служат для автоматического отключения электрической цепи при перегрузках, КЗ, чрезмерном понижении напряжения питания, изменении направления мощности и т. п., а также для редких включений и отключений вручную номинальных токов нагрузки.

К автоматам предъявляются следующие требования.

1. Токоведущая цепь автомата должна пропускать номинальный ток в течение сколь угодно длительного времени. Режим продолжительного включения для автомата является нормальным. Токоведущая система автомата может подвергаться воздействию больших токов КЗ как при замкнутых контактах, так и при включении на существующее КЗ.

2. Автомат должен обеспечивать многократное отключение предельных токов КЗ, которые могут достигать сотен килоампер. После отключения этих токов автомат должен быть пригоден для длительного пропускания номинального тока.

3. Для обеспечения электродинамической и термической стойкости энергоустановок, уменьшения разрушений и других последствий, вызываемых токами КЗ, автоматы должны иметь малое время отключения. С целью уменьшения габаритных размеров распределительного устройства и повышения безопасности обслуживания необходима минимальная зона выхлопа нагретых и ионизированных газов в процессе гашения дуги.

4. Элементы защиты автомата должны обеспечивать необходимые токи и времена срабатывания и селективность (§ 16.5).

В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся на максимальные автоматы по току, минимальные автоматы по току, минимальные автоматы по напряжению, автоматы обратного тока, максимальные автоматы, работающие по производной тока, поляризованные максимальные автоматы (отключают цепь при нарастании тока в одном — прямом направлении) и неполяризованные, реагирующие на возрастание тока в любом направлении.

Для построения селективно действующей защиты автомат должны иметь регулировку тока и времени срабатывания.

В некоторых случаях требуется комбинированная защита — максимальная по току и минимальная по напряжению. Автоматы, удовлетворяющие этим требованиям, называются универсальными.

Автоматы общепромышленного и бытового применения обычно имеют лишь максимально-токовую защиту, отрегулированную на заводе. В эксплуатации характеристики автомата не могут быть изменены. Для уменьшения возможности соприкосновения персонала с деталями, находящимися под напряжением, эти автоматы закрыты пластмассовым кожухом и практически не выбрасывают дугу. Такие автоматы называются установочными.

В любом автомате есть следующие основные узлы: токоведущая цепь, дугогасительная система, привод автомата, механизм автомата, механизм свободного расцепления и элементы защиты — расцепители.

В автомате на ток более 200 А (рис. 17.1) токоведущая цепь имеет главные *3* и дугогасительные *1* контакты. Включение автомата может производиться вручную рукояткой *12* или электромагнитом *4*. Звенья *6*, *7* и упор *13* образуют механизм свободного расцепления (§ 17.3). Отключение автомата может производиться рукояткой *12* или с помощью тепловых и электромагнитных расцепителей *5*, *8*, *10*, *11*. Необходимая скорость расхождения контактов обеспечивается пружиной *9*. Гашение дуги происходит в камере *2*.

Основными параметрами автоматов являются: собственное и полное время отключения, номинальный длительный ток, номинальное напряжение, предельный ток отключения.

Под собственным временем отключения автомата понимают время от момента, когда ток достигает значения тока срабатывания $I_{ср}$, до начала расхождения его контактов. После расхождения контактов возникающая электрическая дуга должна быть погашена за наименьшее время с перенапряжением, не представляющим опасности для остального оборудования.

На рис. 17.2, *а* показано изменение тока и напряжения на контактах в процессе отключения для небыстродействующего автомата, а на рис. 17.2, *б* — для быстродействующего. Ради простоты примем, что до КЗ ток нагрузки $i_н = 0$. Установившийся ток КЗ — $I_{к,уст}$. От момента начала КЗ ток растет по закону экспоненты до значения тока срабатывания автомата $I_{ср}$ (время t_0). Время t_0 зависит от уставки

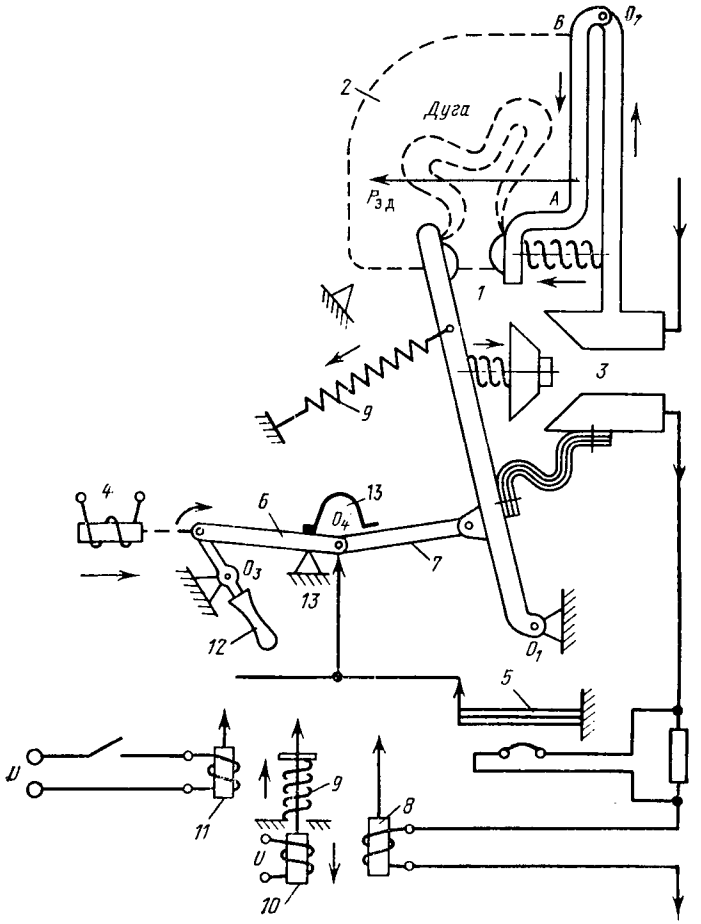


Рис. 17.1. Принципиальная схема автомата

по току срабатывания и скорости нарастания тока, которая определяется параметрами цепи КЗ. После этого до момента размыкания контактов проходит время t_1. Это время тратится на работу механизма расцепления, выбор провала контактов и является собственным временем отключения автомата. После расхождения контактов дуга гаснет за время t_2. Время, равное $t_{откл}=t_0+t_1+t_2$, является полным временем отключения автомата.

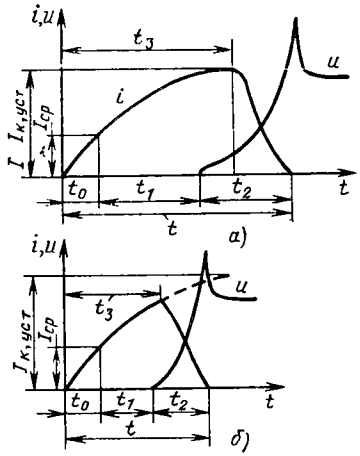


Рис. 17.2. Изменение тока цеп и напряжения на контактах в про цессе отключения

Собственное время от ключения автомата зависи от способа расцепления конструкции контактов, мас сы подвижных частей и дру гих факторов. Если $t_1 \geqslant$ $\geqslant 0{,}01$ с, то автомат называ ется обыкновенным (небы стродействующим). В этом случае к моменту размыка ния контактов цепи ток до стигает установившегося значения $I_{к,уст}$. Такой авто мат не обеспечивает токоог раничения и его контактами отключается установившийся ток КЗ.

В быстродействующих автоматах время t_1 сокращается до 0,002—0,008 с, и к моменту расхождения контактов ток не достигает установившегося значения. Такой автомат, как правило, отключает ток, значительно меньший установившегося тока КЗ. Благодаря этому облегчается работа самого автомата, уменьшается термическая и динамическая нагрузка аппаратуры и оборудования. С увеличением скорости возрастания тока эффект токоограничения уменьшается, так как к моменту расхождения контактов ток достигает больших значений. Для получения токоограничения в этих автоматах применяются устройства, реагирующие не на ток, а на скорость его нарастания.

17.2. ТОКОВЕДУЩАЯ ЦЕПЬ И ДУГОГАСИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТОВ

а) **Токоведущая цепь.** Наиболее важной частью токоведущей цепи автоматов являются контакты. При номинальных токах до 200 А применяется одна пара контактов, которые для увеличения дугостойкости могут быть облицованы металлокерамикой. При токах более 200 А применяются двухступенчатые контакты типа перекатывающегося контакта (рис. 3.15) или пары главных и дугогасительных контактов. Основные контакты облицовываются серебром либо металлокерамикой (серебро, никель, графит). Дугогасительный неподвижный контакт покрывается металлокера-

ликой СВ-50 (серебро, вольфрам), подвижный — СН-29Г3. Применяется металлокерамика и других марок. Работа таких контактов рассмотрена в § 3.4. В автоматах на большие номинальные токи применяется несколько параллельных пар главных контактов.

В быстродействующих автоматах с целью уменьшения собственного времени применяются исключительно торцевые контакты, имеющие малый провал. Контакты изготавливаются из меди, а поверхности касания подвергаются серебрению. В настоящее время проводятся работы по созданию искусственного жидкостного охлаждения контактов [3.2]. Такое решение позволяет сохранить малую массу и быстродействие автомата и увеличить длительный ток с 2,5 до 10 кА.

Устойчивость контактирования при включении на короткое замыкание зависит от скорости нарастания контактного нажатия. При амплитуде включаемого тока более 30—40 кА применяются автоматы моментного действия, у которых скорость движения контактов и контактное нажатие не зависят от скорости перемещения включающего механизма.

В универсальных автоматах, работающих селективно, создается определенная выдержка времени при протекании тока короткого замыкания, и размыкание контактов в течение этого времени недопустимо.

Во избежание приваривания контактов применяется электродинамическая компенсация. Один из вариантов такого компенсатора показан на рис. 17.1. При протекании тока в дугогасительном контуре на проводник AB, несущий неподвижный дугогасительный контакт, действует электродинамическое усилие $P_{эд}$, увеличивающее нажатие контактов.

В установочных и быстродействующих автоматах, у которых при коротком замыкании отключение происходит без выдержки времени, электродинамическая компенсация не применяется, так как она ведет к увеличению собственного времени отключения.

б) **Дугогасительная система.** В автоматах применяются полузакрытое и открытое исполнения дугогасительных устройств. В полузакрытом исполнении автомат закрыт изоляционным кожухом, имеющим отверстия для выхода горячих газов. Объем кожуха достаточно велик для исключения внутри больших избыточных давлений. Зона выброса горячих и ионизированных газов составляет несколько сантиметров от выхлопных щелей. Такое исполнение применяется

в установочных и универсальных автоматах, монтируемых рядом с другими аппаратами, в распределительных устройствах, автоматах с ручным управлением. Предельный отключаемый ток не превышает 50 кА.

В быстродействующих автоматах и автоматах на большие предельные токи (100 кА и выше) или большие напряжения (выше 1000 В) применяются дугогасительные устройства открытого исполнения с большой зоной выброса.

В установочных и универсальных автоматах массового применения широко используется деионная дугогасительная решетка из стальных пластин (§ 4.11). Поскольку эти автоматы предназначены как для переменного, так и для постоянного тока, число пластин выбирается из условия отключения цепи постоянного тока. На каждую пару пластин должно приходиться напряжение не более 25 В. В цепях переменного тока с напряжением 660 В такие дугогасительные устройства обеспечивают гашение дуги с током до 50 кА. На постоянном токе эти устройства работают при напряжении до 440 В и отключаемых токах до 55 кА. При этом дуга горит с минимальным выбросом ионизированных и нагретых газов из дугогасительного устройства.

При больших токах применяются лабиринтно-щелевые камеры и камеры с прямой продольной щелью. Втягивание дуги в щель осуществляется магнитным дутьем с катушкой тока. Продольно-щелевая камера может иметь несколько параллельных щелей неизменного сечения. Это уменьшает аэродинамическое сопротивление камеры и облегчает вхождение в нее дуги с большим током. Вначале дуга разбивается по щелям на ряд параллельных дуг. Но затем из всех параллельных дуг остается лишь одна. Гашение этой дуги завершает процесс отключения. Стенки камеры и перегородки изготавливаются из асбоцемента или керамики.

В лабиринтно-щелевой камере (см. рис. 4.24) постепенное вхождение дуги в зигзагообразную щель не создает высокого аэродинамического сопротивления при больших токах. Узкая щель повышает градиент напряжения в дуге, что сокращает необходимую ее длину при гашении. Зигзагообразная форма щели уменьшает габаритные размеры автомата. В такой камере дуга интенсивно охлаждается стенками. Поэтому материал камеры должен обладать высокими теплопроводностью и температурой плавления.

Для того чтобы камера не разрушалась под воздействием температуры, дуга должна двигаться непрерывно с большой скоростью. Это требует создания мощного магнитного

поля на всем пути движения дуги в щели. При недостаточно высокой скорости движения дуги происходит разрушение дугогасительного устройства (§ 18.7). В качестве материала для камеры применяется керамика — кордиерит. Газообразующие материалы типа фибры и органического стекла не применяются из-за повышения аэродинамического сопротивления вхождению дуги в камеру.

В настоящее время с целью упрощения конструкции (отказ от мощных и сложных систем магнитного дутья) вновь возвращаются к использованию деионной стальной решетки. Стальные, изолированные керамикой пластины, имеющие паз для дугогасительных контактов, создают усилие, перемещающее дугу. Гашение дуги происходит так же, как в камере с поперечными изоляционными перегородками, но при отсутствии специальной системы магнитного дутья.

17.3. ПРИВОДЫ И МЕХАНИЗМЫ УНИВЕРСАЛЬНЫХ И УСТАНОВОЧНЫХ АВТОМАТОВ

а) **Приводы.** Привод должен обеспечить усилие на контактах, необходимое для включения автомата в самом тяжелом случае — на существующее КЗ.

Приводы могут быть ручные и электромеханические. Ручные приводы применяются при номинальных токах до 200 А. При токах до 1 кА применяются электромагнитные приводы, обеспечивающие необходимую скорость нарастания давления в контактах. Недостатками электромагнитного привода являются большие скорости движения и удары в механизме, которые могут приводить к вибрации контактов.

Обычно электромагнитный привод автомата питается от той же сети, что и нагрузка. Напряжение на приводе в момент включения на существующее КЗ падает до нуля, и автомат может не включиться. В приводе независимого действия энергия, необходимая для включения, накапливается в заведенной пружине. После подачи команды на включение освобождается удерживающая защелка пружины и автомат включается при любых напряжениях сети. При ручном включении привод независимого действия можно получить, если использовать принцип прыгающего контакта (рис. 9.13).

В автоматах на токи 1500 А и выше желательно применение электродвигательного привода. Электродвигатель соединен с автоматом через понижающую зубчатую передачу. Даже при потере напряжения кинетической энергии, накоп-

ленной в быстровращающемся роторе двигателя, бывает достаточно, чтобы закончить процесс включения. Достоинствами этого привода являются плавный ход механизма и отсутствие ударов.

б) **Механизм передачи усилия от привода к контактам** выполняет следующие функции: передает движение от привода к контактам и удерживает их во включенном положении, освобождает контакты при отключении автомата, сообщает контактам скорость, необходимую для гашения дуги, фиксирует контакты в отключенном положении и подготавливает автомат для нового включения.

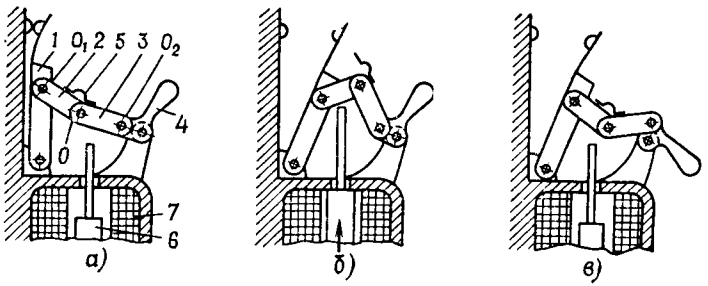


Рис. 17.3. Механизм простейшего автомата

Ввиду специфичности быстродействующих автоматов здесь рассматриваются только механизмы установочных и универсальных автоматов. На рис. 17.3 показан простейший механизм для автоматов с током до 1000 А.

При отсутствии аварийной ситуации звенья *2* и *3* составляют один жесткий рычаг, так как центр шарнира *O*, соединяющего эти звенья, лежит ниже прямой, соединяющей точки O_1 и O_2, а упор *5* не дает возможности сложиться этим звеньям (рис. 17.3, *а*).

При включении на КЗ по обмотке электромагнита *7* начинает протекать большой ток. Якорь *6* втягивается в обмотку и ломает рычаг, как это показано на рис. 17.3, *б*. Рукоятка *4* и контактный рычаг *1* оказываются расцепленными. Под действием отключающей пружины, не показанной на рисунке, плоской контактной пружины и массы подвижных частей контакты размыкаются и происходит отключение автомата. Рукоятка привода может вращаться против часовой стрелки, не оказывая воздействия на состояние

контактов. Для подготовки к новому включению необходимо повернуть рукоятку *4* до отказа по часовой стрелке. Звенья *2* и *3* сложатся и при обесточенном электромагните снова составят жесткий рычаг (рис. 17.3, *в*). Недостатком механизма является относительно большое усилие расцепления, так как при этом необходимо деформировать контактную пружину. С ростом номинального тока растет нажатие контактных пружин, а следовательно, и усилие, необходимое для расцепления автомата.

При токах более 1000 А прибегают к другим типам механизмов свободного расцепления [3.3].

Необходимо отметить, что при отключении КЗ скорость перемещения подвижных частей может возрасти из-за действия электродинамических сил. В конечном положении хода происходит удар подвижных частей о неподвижную опору и отброс контактов в направлении «включено». Отброс контактов может привести к новому замыканию цепи, в связи с чем устанавливаются демпферы отключения. Иногда подвижная часть в положении «отключено» сажается на специальную защелку. Расцепление защелки происходит при повороте рукоятки в направлении «готов к включению».

17.4. РАСЦЕПИТЕЛИ АВТОМАТОВ

Отключение автоматов происходит под действием на механизм свободного расцепления элементов защиты — расцепителей. Наиболее распространены максимальные расцепители. Для защиты оборудования от перегрузок необходимо, чтобы времятоковая характеристика расцепителя шла возможно ближе к характеристике защищаемого объекта.

В максимальных расцепителях широко используются электромагнитные системы и тепловые системы с биметаллической пластиной. Электромагнитный расцепитель (поз. *8*, рис. 17.1) прост по конструкции, обладает высокой термической и электродинамической стойкостью и стойкостью к механическим воздействиям. До момента воздействия на механизм свободного расцепления якорь расцепителя обычно преодолевает значительный свободный ход (5—10 мм). Расцепление происходит за счет удара, в котором основную роль играет кинетическая энергия якоря, накопленная при его движении. Обмотка электромагнита расцепителя включена последовательно с нагрузкой. Регулирование тока срабатывания может производиться за счет натяжения про-

тиводействующей пружины расцепителя или изменения числа витков обмотки.

Для создания выдержек времени между электромагнитом и механизмом свободного расцепления ставятся устройства задержки. Селективно работающие автоматы должны быть строго согласованы по времени срабатывания, что достигается применением часовых механизмов. Выдержка времени таких устройств не зависит от тока, поэтому они не приспособлены для защиты от перегрузок.

Выдержки времени, зависимые от тока нагрузки, создаются разнообразными замедляющими устройствами, осуществляющими демпфирование за счет вязкости перетекающей жидкости или газа. Наиболее просто зависящая от тока выдержка времени получается с помощью тепловых расцепителей (поз. *5*, рис. 17.1), аналогичных по конструкции тепловым реле. Их времятоковая характеристика достаточно хорошо согласуется с защищаемым объектом. Однако эти расцепители имеют следующие недостатки:

1. Слабая термическая стойкость требует высокого быстродействия при отключении больших токов. В этих случаях обычно применяется комбинация из электромагнитного и теплового расцепителей. Электромагнитный расцепитель работает при КЗ, тепловой — при перегрузках.

2. С ростом отключаемого тока растет усилие, необходимое для расцепления автомата. Поэтому тепловой расцепитель применяется при токах до 200 А.

3. Выдержка времени тепловых расцепителей зависит от температуры окружающей среды, что ограничивает их применение.

4. Разброс в токе срабатывания у тепловых расцепителей примерно в 2 раза больше, чем у электромагнитных.

5. Малая термическая стойкость тепловых расцепителей определяет малую допустимую длительность КЗ, что затрудняет получение необходимой селективности.

Более совершенной является защита с помощью полупроводникового расцепителя (рис. 12.17).

Для дистанционного отключения автомата устанавливается независимый электромагнитный расцепитель (поз. *11*, рис. 17.1), электромагнит которого может быть как постоянного, так и переменного тока. Обмотка электромагнита рассчитывается на кратковременный режим работы.

Номинальное напряжение расцепителя берется не выше 220 В. Если источник питания имеет более высокое напряжение, то ставится добавочный резистор.

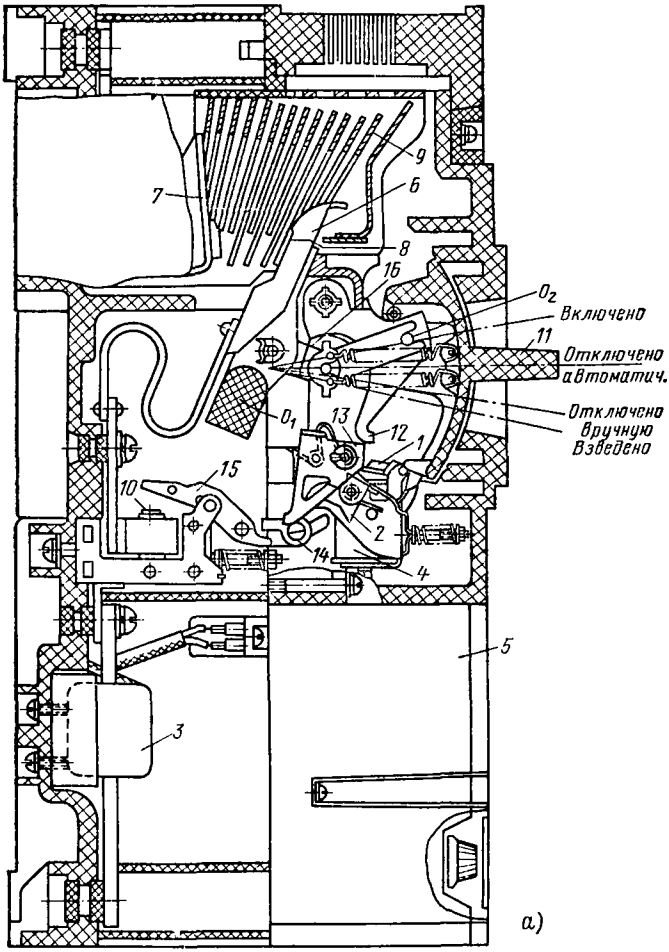
Минимальный расцепитель выполняется также электромагнитного типа (поз. *10*, рис. 17.1). Для разрыва цепи катушки в отключенном положении она питается через замыкающий вспомогательный контакт. Этот контакт при включении замыкается раньше главных контактов. Благодаря этому механизм подготавливается к работе в процессе самого включения. Напряжение отпускания электромагнита регулируется в пределах 35—70 % номинального. При напряжении, меньшем напряжения уставки, пружина отрывает якорь и воздействует на механизм свободного расцепления.

Минимальный расцепитель может использоваться для дистанционного отключения, если последовательно с ним включить кнопку с размыкающим контактом. Если же минимальный расцепитель воздействует на механизм свободного расцепления через часовой механизм с выдержкой времени, то дистанционное отключение должно производиться независимым расцепителем.

17.5. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ И УСТАНОВОЧНЫЕ АВТОМАТЫ

а) **Автоматы серии А-3700 (рис. 17.4, *а*).** Неподвижный контакт *7* имеет возможность небольшого перемещения и находится под действием контактной пружины (аналогично рис. 17.1). Подвижный контакт *6* укреплен на изоляционном рычаге, связанном с механизмом аппарата через тягу *16*. Контакты имеют металлокерамические накладки *8*. Ток коммутируемой цепи проходит также через катушку электромагнита максимального расцепителя *10* и трансформатор тока *3*. Автоматы этой серии могут быть токоограничивающими и селективными. В первых при больших токах КЗ неподвижный контакт *7* отбрасывается влево электродинамической силой в точке касания контактов и дуга возникает до начала движения подвижного контакта. Если первоначально ток цепи составлял 100 кА, то через 1 мс за счет сопротивления дуги он уменьшается до 20—50 кА. Повторное касание контактов не происходит, так как расцепитель *10* с помощью якоря *15* освобождает механизм и начинается движение контакта *6*. Гашение дуги осуществляется дугогасительной решеткой *9* (§ 4.11). Полное время срабатывания токоограничивающего автомата 10—15 мс.

В селективных автоматах используется электродинамический компенсатор, аналогичный показанному на рис. 17.1. Контакты не размыкаются до тех пор, пока не начнется движение рычага *16*. Работу механизма автомата рассмотрим на конструктивной схеме (рис. 17.4, *б*). В автомате используется принцип моментного включения, когда замыкание и размыкание контактов осуществляется заранее заводимой пру-



жиной *12*. При этом скорость движения контактов достаточно высока и не зависит от скорости включающей рукоятки *11*. Принцип действия пружины наглядно показан на рис. 9.13. Элементами защиты являются тепловой расцепитель *1*, обтекаемый током, и электромагнитный *2*. Оба расцепителя действуют на удерживающий рычаг *14* с зубом *13*, который зацепляется за рычаг *10* механизма включения. Для подготовки автомата к включению рукоятка *11* переводится вниз. При этом нижняя часть рычага *10* сцепляется с зубом *13*. Под действием пружины *12* рычаги *4* и *5* находятся в положении, указанном на рис. 17.4, *в*. Стрел-

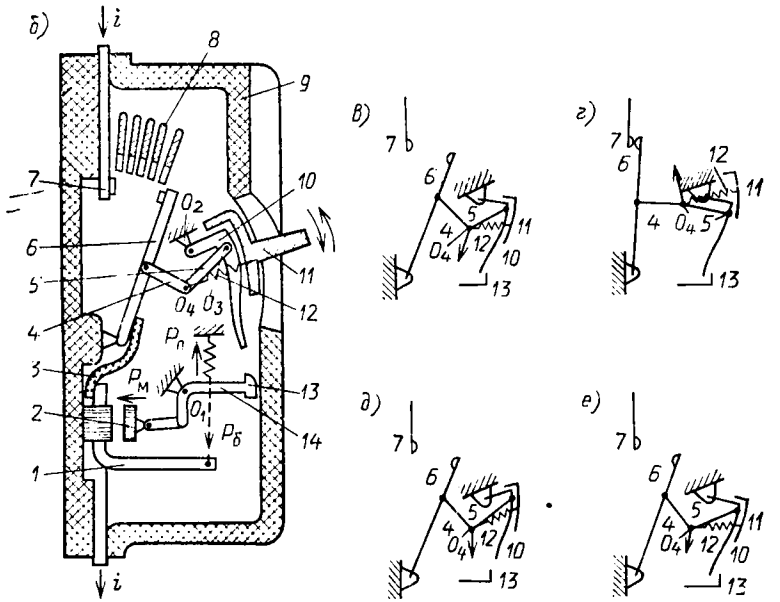


Рис. 17.4. Автомат серии А-3700:

а — разрез общего вида автомата; *б* — механизм автомата; *в—е* — положения механизма (нумерация позиций на рис. 17.3, *б* отличается от принятой на рис. 17.3, *а*)

кой показано направление силы, действующей на шарнир O_4 рычагов *4* и *5*. Для включения рычаг переводится вверх. Правый конец пружины перемещается, и на шарнир O_4 действует сила, направленная вверх. Под действием этой силы контакт *6* замыкается с контактом *7*. Автомат включен. При срабатывании элементов защиты *1* и *2* от тока перегрузки или КЗ рычаг *14* опускается вниз и зуб *13* расцепляется с рычагом *10*. Этот рычаг перемещается вверх, а пружина *12* создает силу, действующую на шарнир O_4 вниз (рис. 17.4, *д*), при этом контакт *6* размыкается с контактом *7*. Происходит отключение автомата. Автомат может быть отключен от руки. Для этого из включенного положения автомата рукоятка *11* перемещается вниз (рис. 17.4, *е*). При этом правый конец пружины *12* перемещается вниз, и она создает усилие, действующее на точку O_4 вниз. Контакты *6* и *7* размыкаются. В автомате А-3700 при перегрузках полупроводниковый блок защиты *5* подает сигнал на независимый электромагнитный расцепитель *4* (рис. 17.4, *а*). Якорь этого расцепителя *1* действует на механизм свободного расцепления. Полупроводниковый блок защиты позволяет регулировать номинальный ток

устройства и выдержку времени срабатывания в широких пределах. При перегрузках возврат полупроводникового блока в начальное состояние обеспечивается, если после истечения 75 %-ной выдержки времени ток упадет до $I_{ном}$. При КЗ возврат полупроводникового блока обеспечивается, если после 50, 170, 320 мс с начала КЗ ток упадет до 70 %-ной уставки тока КЗ.

В автоматах переменного тока полупроводниковый блок защиты питается от трансформатора тока *3*. В автоматах постоянного тока вместо трансформатора в качестве датчика тока используется дроссельный магнитный усилитель (§ 6.1). Питание блока датчика тока производится от специального стабилизированного источника. В процессе эксплуатации работа полупроводникового блока защиты может быть проверена без вывода автомата в ревизию.

Полупроводниковый блок защиты работоспособен при колебании напряжения сети в пределах 85—110 % номинального значения.

Автомат может снабжаться электромагнитным приводом для дистанционного управления. Выходной элемент привода воздействует на рукоятку *11* и обеспечивает включение и отключение аппарата.

Номинальные токи автоматов серии А-3700 составляют 160—630 А при переменном напряжении до 660 и постоянном до 440 В. Максимально допустимый ток КЗ сети, в которой может быть установлен автомат, достигает по амплитуде 200 кА. Износостойкость достигает $(5 \div 10) \cdot 10^3$ в зависимости от номинального тока аппарата [3.3].

б) **Автоматы серии «Электрон»** разработаны для сетей с номинальным током 250—4000 А. Такие автоматы (рис. 17.5) имеют главную (*1, 2, 3*) и дугогасительную (*4, 5*) контактные системы. Контактирующие поверхности облицованы металлокерамикой. Для повышения динамической стойкости используется компенсатор *8*. При отключении поворачивается рычаг *9*. Сначала перемещается мостик *1*, и между главными контактами образуется зазор 6 мм, после чего размыкаются контакты *4, 5*. Образующаяся дуга затягивается в дугогасительную камеру с металлическими пластинами *6*. Для ограничения выброса пламени и ионизированных газов дугогасительная камера закрыта пламегасителем *7*. Он представляет собой набор медных пластин, установленных с зазором. Нагретые выхлопные газы и пламя, соприкасаясь с пластинами, охлаждаются и зона выброса горячих газов уменьшается.

Отключаемый ток автомата достигает 65 кА при номинальном переменном напряжении 660 и постоянном 440 В. Конструкция выходных и входных контактов позволяет легко вкатывать и выкатывать автомат из установки по специальным рельсам для ремонта и ревизии. Дистанционное включение автомата производится электромагнитным (при $I_{ном} = 600$ А) или пружинным приводом (при $I_{ном} = 1000 \div 4000$ А).

Принципиальная схема полупроводникового расцепителя автомата «Электрон» приведена на рис. 12.17.

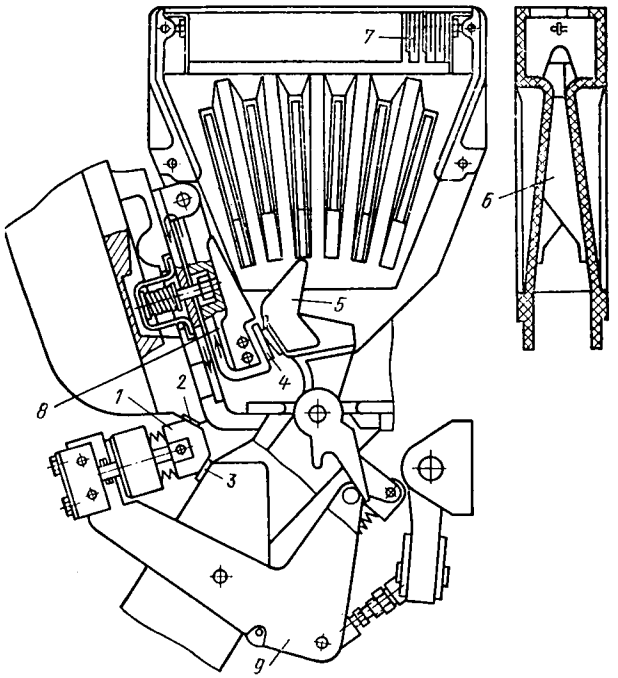


Рис. 17.5. Контактная и дугогасительная системы автомата серии «Электрон»

17.6. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АВТОМАТЫ

Быстродействие автомата может быть повышено за счет сокращения собственного времени отключения и времени гашения дуги. Последнее ограничивается уровнем перенапряжений. Чем быстрее уменьшается ток, тем выше перенапряжение (§ 4.2). Длительность гашения дуги в настоящее время доведена до $(1{,}5 \div 2) \cdot 10^{-2}$ с (на постоянном токе). Дальнейшее уменьшение длительности гашения дуги на данном этапе развития техники не представляется перспективным. Поэтому в настоящее время основное внимание уделяется уменьшению собственного времени отключения автомата.

Для получения малого собственного времени отключения контакты быстродействующих автоматов выполняются торцевыми и с малым провалом (порядка 8—10 мм). Макси-

мальное расстояние между контактами берется небольшим и составляет 18—22 мм при номинальном напряжении до 3000 В. Образование дуги и ограничение тока за счет ее сопротивления начинаются при расстоянии между контактами 1—1,5 мм. Для уменьшения оплавления контактов и ускорения разрыва металлического мостика в месте расположения контактов создается мощное магнитное поле.

Для уменьшения собственного времени отключения необходимо максимально сократить время от момента достижения током значения $I_{ср}$ до момента расхождения контактов. В связи с этим в быстродействующих автоматах не применяются механизмы с ломающимся рычагом и электромагнитные расцепители с большим свободным ходом якоря. Стремятся либо непосредственно связать якорь электромагнита с контактом, либо максимально упростить эти связи.

По характеру отключаемых цепей быстродействующие автоматы делятся на линейные, катодные и анодные. Из существующих конструкций наиболее универсальны быстродействующие автоматы серии ВАБ-28 на номинальные токи от 1,5 до 6 кА и номинальные напряжения от 825 до 3300 В. Выключатель ВАБ-28 (рис. 17.6) содержит электромагнит

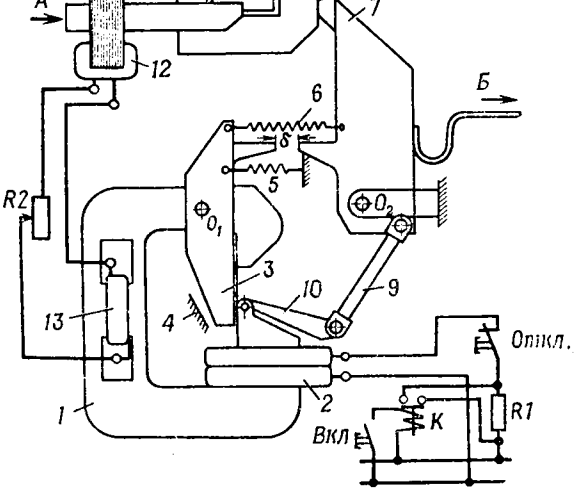


Рис. 17.6. Механизм автомата ВАБ-28

постоянного тока *1* с удерживающей катушкой *2* и якорь *3*, который может поворачиваться вокруг оси O_1 до упора *4*. При включенном электромагните якорь *3* удерживается в положении, показанном на рисунке, электромагнитной силой так, что отключающая пружина *5* и контактная пружина *6* растянуты. Ток защищаемой цепи проходит по шине 1, катушке магнитного дутья *8*, подвижному контакту *7* и шине *Б*. Отключение катодного автомата происходит при обратном зажигании ртутного вентиля, когда ток в цепи меняет свой знак. Резкое спадание тока в цепи (ток переходит через нулевое значение) вызывает ЭДС в обмотке *12*, сидящей на сердечнике *11*, охватывающем шинопровод. Эта ЭДС прикладывается к обмотке *13*, расположенной на магнитопроводе.

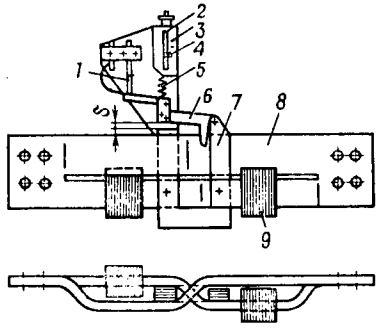


Рис. 17.7. Реле типа РДШ

Магнитный поток обмотки *13* насыщает участки магнитопровода электромагнита, что приводит к резкому увеличению магнитного сопротивления на пути основного потока. Сила притяжения якоря *3* уменьшается, и он начинает двигаться под действием пружин *5* и *6*. Большая скорость размыкания подвижного контакта *7* достигается за счет кинетической энергии якоря *3*, полученной им при разгоне. После выбора зазора δ эта энергия ударом передается контакту *7*. Регулирование тока срабатывания производится резистором *R2*.

В процессе включения якорь механизма свободного расцепления *10* притягивается к скошенному полюсу электромагнита *1*. Включение выключателя возможно, если в удерживающей обмотке *2* резко увеличить ток, что осуществляется контактором *К*, шунтирующим добавочный резистор *R1*. При этом якорь *3* притянется, растянув пружину *6*. Подвижный контакт *7* останется неподвижным, так как его удерживает тяга *9*, соединенная с притянутым якорем свободного расцепления *10*. Замыкание контакта *7* произойдет только после включения в цепь обмотки *2* резистора *R1*, вследствие чего уменьшится сила притяжения якоря свободного расцепления *10* (отпускается кнопка *Вкл*).

Отключение линейных выключателей производится за счет разрыва цепи удерживающей катушки размыкающими контактами специального реле (индуктивный дифференциальный шунт) типа РДШ. В таком реле (рис. 17.7) токоведущая шина *8* разделена на две параллельные ветви. Токи этих ветвей создают противоположно направленные МДС в окружающем шину магнитопроводе *7*. На нижней ветви находятся

пакеты электротехнической стали *9*, которые резко увеличивают ее ин дуктивность. При установившемся токе МДС, создаваемая токами ниж ней и верхней ветвей, равна нулю. При возникновении КЗ ток начинае нарастать по экспоненте и в нижней ветви возникает ЭДС $L\,di_{\text{ниж}}/dt$ препятствующая прохождению тока в ней. В результате большая част тока течет по верхней ветви, появляется МДС, которая вызывает сра батывание реле, и якорь *6* притягивается к полюсу, размыкая контак ты *1*.

Чем больше скорость нарастания тока, тем быстрее срабатывае реле. Оно срабатывает значительно раньше, чем ток достигнет статиче ской уставки. Изменяя натяжение пружины *5* винтом *2*, можно регули ровать ток статической уставки реле, которая указывается стрелкой 4 на шкале *3*.

Гашение дуги осуществляется в продольно-щелевой камере из ас бестоцемента, имеющей три параллельные щели.

Подробное описание серии ВАБ-28 и других, выпускаемых в СССР быстродействующих автоматов приведено в [17.1].

17.7. АВТОМАТЫ ДЛЯ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МОЩНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

При повреждении обмотки статора мощных генераторов перемен ного тока единственным средством ограничения повреждений машины от тока КЗ является быстрое уменьшение магнитного поля возбуждения. Ввиду того что индуктивность L обмотки возбуждения велика, при быстром ее отключении на ней появляется напряжение $\Delta u = L di/dt$, до статочное для пробоя изоляции обмотки. Для того чтобы быстро от ключить обмотку и ограничить перенапряжения, применяются специ альные автоматы гашения поля с дугогасительной решеткой. На рис. 17.8, *а* показана обмотка возбуждения $R_{\text{в}}$, L генератора, питающаяся от возбудителя *В*. Для ограничения перенапряжений и ускорения отклю чения используются замыкающий *К1* и размыкающий *К2* контакты. При отключении вначале замыкается контакт *К1*, а затем размыкается контакт *К2*. Условия гашения дуги в контакте *К2* облегчены, так как большая электромагнитная энергия, накопленная в обмотке возбуж дения, тратится в резисторе $R_{\text{р}}$. Этот же резистор ограничивает ток воз будителя после замыкания контакта *К1*.

Изменение тока в цепи возбуждения определяется уравнением

$$i\,(R_{\text{в}} + R_{\text{р}}) + L\frac{di}{dt} = 0, \tag{17.1}$$

решение которого имеет вид

$$i = \frac{U_0}{R_{\text{в}}}\,e^{-(R_{\text{р}}+R_{\text{в}})t/L}, \tag{17.2}$$

где U_0 — напряжение на возбудителе при $t=0$.

Напряжение на зажимах обмотки при $t=0$

$$U=\frac{U_0}{R_в}R_р. \qquad (17.3)$$

Анализ (17.2) и (17.3) показывает, что для быстрого спада тока необходимо увеличивать $R_р$ (уменьшать постоянную времени). Однако при этом напряжение на обмотке возрастает и может достигнуть недопустимых для изоляции обмотки значений. Сопротивление $R_р$ должно обеспечивать соблюдение условий

$$u=\frac{U_0}{R_в}R_р \leqslant U_{max},$$

где U_{max} — допустимое напряжение на обмотке возбуждения.

Для ускорения спада тока и ограничения напряжения на обмотке необходимо соблюсти условие

$$L\frac{di}{dt}=-(R_в+R_р)i\approx -U_{max}=\text{const}. \qquad (17.4)$$

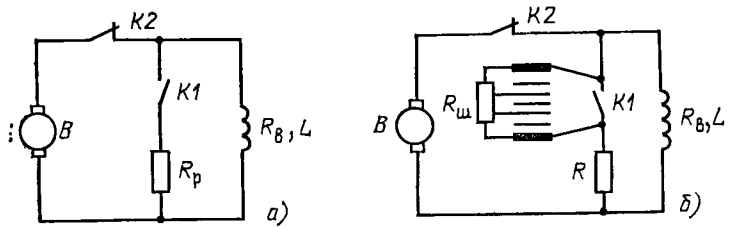


Рис. 17.8. Принцип действия автомата гашения магнитного поля генератора:

а — схема для расчета перенапряжений при отключении обмотки возбуждения генератора; *б* — включение автомата гашения поля

Отсюда $R_в+R_р=\text{const}/i$. Учитывая, что обычно $R_в \ll R_р$, можно написать

$$R_р=\text{const}/i. \qquad (17.5)$$

Чтобы магнитное поле возбуждения спадало с максимальной скоростью и напряжение на обмотке не превышало допустимое значение U_{max}, сопротивление $R_р$ должно быть нелинейным и увеличиваться по мере спада тока. Из (17.5) следует $u_р=iR_р=\text{const}$, т. е. напряжение на сопротивлении $R_р$ должно быть неизменным, несмотря на уменьшение тока. Такой характеристикой обладает дуга, горящая между медными пластинами дугогасительной решетки (§ 4.11). Дело в том, что в короткой дуге напряжение на ней в основном определяется катодным падением напряжения, которое не зависит от тока.

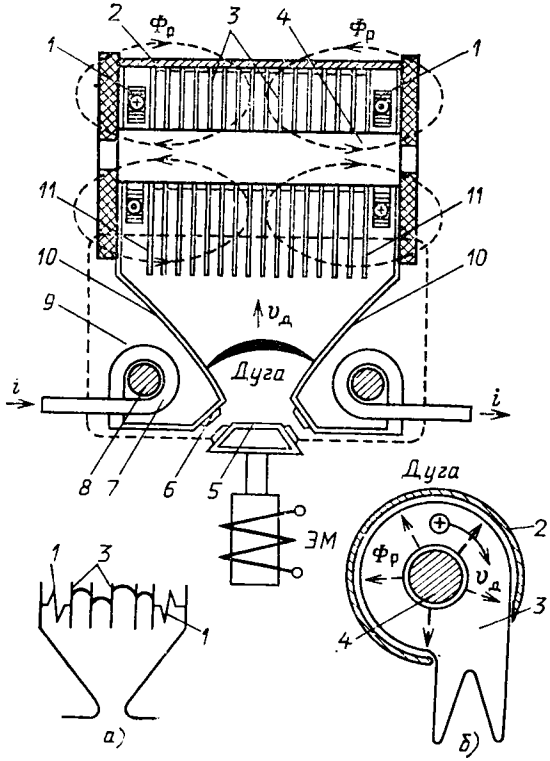


Рис. 17.9. Конструктивная схема автомата гашения магнитного поля

Проинтегрировав (17.4) и приняв, что при $t=0$ $i=U_0/R_в$, получим

$$i = \frac{U_0}{R_в} - \frac{U_{max}}{L} t.$$

Таким образом, ток спадает по линейному закону. Время гашения дуги $t_{гаш}$ можно определить, положив $i=0$

$$t_{гаш} = U_0 L/(U_{max} R_в).$$

В автомате гашения поля роль резистора $R_р$ играет электрическая дуга в дугогасительной решетке рис. 17.8, *б*. Резистор R служит для ограничения тока возбудителя после замыкания контакта *К1*. Работа аппарата протекает в следующем порядке: вначале замыкается контакт *К1*, после чего отключается контакт *К2*. Затем размыкается контакт *К1* и образующаяся дуга с помощью магнитного поля затягивается в дуго-

ительную решетку и разбивается на ряд коротких дуг. Для уменьшения перенапряжений, возникающих при обрыве тока, параллельно секциям дугогасительной решетки включаются шунтирующие резисторы $R_ш$.

Конструкция автомата в упрощенном виде представлена на рис. 7.9. После отключения электромагнита *ЭМ* контакты *5*, *6* размыкаются с помощью катушки *7* и магнитной системы *8*, *9* дуга перемещается верх, пока не достигнет пластин *3* дугогасящего устройства. Концы атушек *1* присоединены к рогам *10* и пластинам *11*. Магнитный поток атушек *1* замыкается через сердечник *4* и стальной кожух *2*. Ток, проекая по катушкам *1*, создает радиальное магнитное поле $Ф_р$, которое, заимодействуя с током дуги, заставляет дугу вращаться по окружности о скоростью $v_д$. Большая скорость вращения предотвращает прогорание пластин *3*. Схема включения катушек *1* показана на рис. 17.9, *а*, перемещение дуги — на рис. 17.9, *б*. В соответствии с рис. 17.8 отдельые группы пластин шунтированы активным резистором для выравнивания распределения напряжения между пластинами. Поскольку номинальный ток автоматов может достигать 6300 А, аппарат имеет систему лавных и дугогасительных контактов. Номинальное напряжение главой цепи 500 В.

17.8. ВЫБОР АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Номинальные значения напряжения $U_{ном,а}$ и тока $I_{ном,а}$ втомата, тока нагрузки $I_{ном,п}$ и напряжения сети $U_{ном,с}$ олжны удовлетворять соотношениям: $U_{ном,а} \geqslant U_{ном,с}$; $_{ном,а} \geqslant I_{ном,н}$. Для автомата защиты двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток лектромагнитного расцепителя принимается равным току двигателя в режиме ПВ = 25 %. Для автоматов защиты двигателей с короткозамкнутым ротором ток уставки электромагнитного расцепителя

$$I_{уст.эм} \geqslant (1{,}5 \div 1{,}8)\, I_п.$$

Для двигателя с фазным ротором $I_{уст,эм} \geqslant (2{,}5 \div 3)\, I_{ном,дв}$.

Для группы короткозамкнутых двигателей

$$I_{уст,эм} \geqslant (1{,}5 \div 1{,}8)\,[\Sigma I_{ном,дв} + (I_п - I_{ном,дв})'],$$

где разность $(I_п - I_{ном,дв})$ берется для двигателей, у которых она наибольшая.

Для группы двигателей с фазным ротором

$$I_{уст,эм} \geqslant (1{,}5 \div 2)\, I'_{ном,дв} + \Sigma I_{ном,дв},$$

где $I'_{ном,дв}$ — ток двигателя с наибольшим пусковым током.

Для двигателей, работающих в тяжелом или повторно-кратковременном режиме, номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя

$$I_{\text{ном,расц}} \geqslant 1{,}5 I_{\text{ном,дв}}.$$

Выбор по току КЗ:

для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$I_{\text{к}}/I_{\text{уст,эм}} \geqslant 1{,}25 \div 1{,}4;$$

для автоматов с комбинированным расцепителем

$$I_{\text{к}}/I_{\text{н,расц}} \geqslant 3.$$

Предельный ток отключения автомата $I_{\text{отк,авт}}$ должен быть не менее тока $I_{\text{к}}$.

Глава восемнадцатая

ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

18.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

а) **Назначение, основные параметры.** Выключатели высокого напряжения предназначены для коммутации цепей переменного тока с напряжением 3 кВ и выше во всех режимах, возможных в эксплуатации: включение и отключение номинальных токов, токов КЗ, токов холостого хода силовых трансформаторов и емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий. Наиболее тяжелым режимом работы выключателя является отключение и включение токов КЗ.

Основные параметры выключателей: номинальное напряжение, номинальный (длительный) ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток электродинамической стойкости, номинальный ток отключения, номинальная мощность отключения, номинальный ток включения, собственное время включения и отключения выключателя, полное время включения и отключения.

Первые четыре параметра ничем не отличаются от аналогичных параметров других аппаратов, включенных последовательно в рабочую цепь (§ 1.8, 2.4, 2.6). Особенности изоляции аппаратов высокого напряжения рассмотрены в [18.1].

б) **Номинальный ток отключения.** Токи КЗ в современных цепях высокого напряжения достигают сотен килоампер. При таких токах процесс гашения дуги в высоковольт-

ных выключателях очень сложен из-за высокого номинального напряжения и высокой скорости восстановления напряжения (§ 4.4).

Номинальный ток отключения $I_{о,ном}$, представляет собой наибольший ток, который выключатель способен надежно отключать при возвращающемся напряжении между фазами, равном наибольшему рабочему напряжению сети (при заданных условиях восстановления напряжения на контактах выключателя). Значение $I_{о,ном}$ характеризует отключающую способность выключателя. Отключающая способность выключателя часто определяется номинальной мощностью отключения. Номинальная мощность отключения, МВ·А, трехфазного выключателя

$$S_{отк,н} = \sqrt{3} U_{ном} I_{о,ном} \cdot 10^{-6}.$$

Понятие этой мощности условно. Когда по выключателю протекает ток $I_{о,ном}$, то напряжение на зажимах аппарата практически равно напряжению на дуге и составляет несколько процентов напряжения сети. Восстановление этого напряжения происходит после прекращения тока. Таким образом, $U_{ном}$ и $I_{о,ном}$ действуют на выключатель в различное время. Однако $S_{отк,н}$ учитывает нагрузку выключателя этими двумя факторами и по существу представляет собой мощность, близкую к мощности короткого замыкания сети, в которой установлен выключатель.

В большинстве случаев причина, вызывающая КЗ, носит временный характер. Например, в результате перенапряжений произошло перекрытие фарфорового изолятора и возникло КЗ на землю. Если причина быстро исчезла, а фарфоровая изоляция осталась неповрежденной, то при новом включении удается возобновить подачу энергии потребителю. Этот процесс называется автоматическим повторным включением (АПВ) выключателя. Применение АПВ позволяет повысить надежность энергоснабжения.

Время с момента отключения до нового включения должно быть достаточно малым для того, чтобы обеспечить непрерывную работу потребителя. Это время должно быть достаточным для деионизации пробитого промежутка после отключения цепи. Время деионизации составляет примерно 0,1—0,5 с и зависит от напряжения системы.

Если к моменту повторного включения КЗ в цепи не исчезает, тогда выключатель включается на существующее КЗ, после чего следует вновь отключение КЗ. В ряде выключателей, например в масляных, отключение второго КЗ

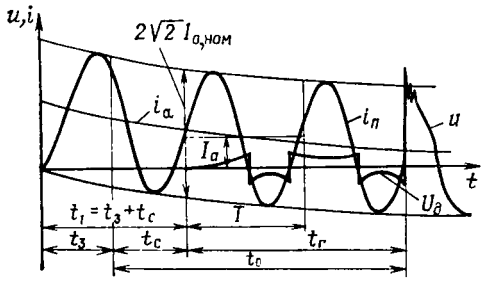


Рис. 18.1. Изменение тока короткого замыкания во времени

происходит в более тяжелых условиях, так как после первого отключения дугогасительное устройство может быть только частично заполнено маслом. Поэтому номинальное значение тока отключения зависит от цикла работы выключателя (без АПВ, с одно- или двукратным АПВ и т. д.).

Согласно ГОСТ 687-78 для выключателей, работающих с АПВ, номинальный ток отключения отключается по следующим циклам: а) О—$t_{бт}$—ВО—180 с—ВО; б) О—180 с—ВО—180 с—ВО, где О — операция отключения; $t_{бт}$=0,3÷÷1,2 с — нормированная бестоковая пауза, которая зависит от типа выключателя (для выключателей с быстродействующим АПВ $t_{бт}$=0,3 с); ВО — операция включения и немедленно следующая за ней операция отключения; 180 с — бестоковая пауза. Для выключателей, работающих без АПВ, должен выполняться только цикл «б». Выключатели на номинальное напряжение до 220 кВ, предназначенные для работы с АПВ, кроме цикла «а» должны обеспечивать цикл О—$t_{бт}$ — ВО — 20 с — ВО.

Действующее значение тока КЗ не остается постоянным из-за изменения периодической и апериодической составляющих. Типичная кривая тока приведена на рис. 18.1.

Начальное значение апериодической составляющей зависит от момента начала КЗ и может изменяться от нуля до амплитуды периодической составляющей. Скорость ее спада определяется постоянной времени цепи. Чем больше мощность установки, тем меньше активное сопротивление цепи и больше постоянная времени.

Контакты выключателя расходятся спустя время t_1 после начала КЗ. Это время представляется в виде суммы

$$t_1 = t_з + t_с,$$

где $t_з$ — время действия релейной защиты; $t_с$ — собственное время отключения выключателя, представляющее собой время с момента подачи команды на отключение (подачи напряжения на электромагнит отключения) до начала расхождения контактов.

К моменту времени t_1 уменьшается как периодическая, так и апериодическая составляющие тока.

Согласно ГОСТ 687-78 под номинальным током отключения $I_{о,ном}$ понимается действующее значение периодической составляющей тока в момент расхождения контактов. Этот ток указывается на щитке выключателя.

Выключатель должен отключать цепь и при наличии апериодической составляющей, которая может существовать к моменту расхождения контактов. При этом ее начальное значение равно амплитуде периодической составляющей, а постоянная времени спада $T_а = 0{,}05$ с.

С апериодической составляющей необходимо считаться у быстродействующих выключателей, когда $t_1 < 0{,}1$ с и постоянная времени спада апериодической слагающей $T_а \geqslant \geqslant 0{,}05$ с.

Сохранность энергетического оборудования, бесперебойность энергоснабжения, динамическая устойчивость параллельно работающих систем требуют, чтобы длительность КЗ была возможно меньшей и ограничивалась временем 0,05—0,1 с. Поэтому все выключатели снабжаются дугогасительными устройствами, обеспечивающими гашение дуги в ограниченном объеме за время несколько сотых секунды.

Полное время отключения выключателя $t_о$ — это время от подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах. Оно состоит из собственного времени отключения $t_с$ и времени гашения дуги $t_г$ ($t_о = t_с + t_г$) (рис. 18.1).

в) **Номинальный ток включения.** При включении на существующее КЗ выключатель подвергается большим механическим, тепловым и электродинамическим нагрузкам (§ 18.4). Способность выключателя включаться на существующее КЗ характеризуется номинальным током включения.

Номинальный ток включения — это наибольший ударный ток КЗ, на который выключатель включается без сваривания контактов и других повреждений, препятствующих его дальнейшей нормальной работе. Этот ток определяется либо амплитудой $i_{уд} = 1{,}8\ \sqrt{2}\ I_{о,ном}$, либо действующим значением ударного тока за период после начала КЗ.

Время включения выключателя — это время от подачи команды на включение до завершения операции включения (посадка привода на защелку, окончание хода отделителя воздушного выключателя).

г) **Требования к выключателям.** Выключатель является наиболее ответственным аппаратом высоковольтной системы. При отказе выключателя авария развивается, что ведет к тяжелым разрушениям и большим материальным потерям, связанным с недоотпуском электроэнергии, прекращением работы крупных предприятий.

В связи с этим основным требованием к выключателям является особо высокая надежность их работы во всех эксплуатационных режимах. Отключение выключателем любых нагрузок не должно сопровождаться перенапряжениями, опасными для изоляции элементов установки. Отключение цепи при КЗ должно происходить за минимально возможное время.

В связи с ростом мощности в единице оборудования (генераторах, трансформаторах) растет частота собственных колебаний цепи, а следовательно, и скорость восстановления напряжений. Выключатель должен обеспечивать надежное отключение цепи при условиях восстановления напряжения, определяемых ГОСТ 687—78.

Вывод выключателя из рабочего состояния для ревизии и ремонта связан с большими трудностями, так как приходится либо переходить на другую схему распредустройства, либо просто отключать потребителя. В связи с этим выключатель должен допускать возможно большее число отключений КЗ без ревизии и ремонта. Современные выключатели могут отключать без ревизии до десяти КЗ при токе отключения, равном номинальному $I_{о,ном}$.

Отключение выключателем КЗ не должно сопровождаться выбросом из него пламени и раскаленных газов, что может привести к перекрытию изоляции в распределительном устройстве.

д) **Классификация выключателей.** Выключатели могут быть классифицированы по методу гашения дуги, виду изоляции токоведущих частей между собой и на землю, принципам, заложенным в конструкцию дугогасительного устройства.

В масляных выключателях дуга, образующаяся между контактами, горит в трансформаторном масле. Под действием энергии дуги масло разлагается и образующиеся газы и пары используются для ее гашения. В зависимости от

способа изоляции токоведущих частей различают баковые выключатели и маломасляные. В первых токоведущие части изолируются между собой и от земли с помощью масла, находящегося в стальном баке, соединенном с землей. В маломасляных выключателях изоляция токоведущих частей от земли и между собой производится с помощью твердых диэлектриков и масла.

В воздушном выключателе в качестве гасящей среды используется сжатый воздух, находящийся в баке под давлением 1—5 МПа. При отключении сжатый воздух из бака подается в дугогасительное устройство. Дуга, образующаяся в камере дугогасительного устройства (*ДУ*), обдувается интенсивным потоком воздуха, выходящим в атмосферу. Изоляция токоведущих частей между собой осуществляется с помощью твердых диэлектриков и воздуха. В элегазовых выключателях гашение дуги осуществляется за счет охлаждения ее двигающимся с большой скоростью элегазом (шестифтористой серой SF_6), который используется и как изолирующая среда.

Электромагнитные выключатели по своему принципу аналогичны контакторам постоянного тока с лабиринтно-щелевой камерой (см. рис. 4.24). Гашение дуги происходит за счет увеличения сопротивления дуги вследствие ее интенсивного удлинения и охлаждения.

В вакуумных выключателях контакты расходятся под вакуумом (давление равно 10^{-4} Па). Возникающая при расхождении контактов дуга быстро гаснет благодаря интенсивной диффузии зарядов в вакууме (§ 4.11).

18.2. БАКОВЫЕ МАСЛЯНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Баковый масляный выключатель показан на рис. 18.2. В стальном баке *1* на маслонаполненных вводах *2* расположены дугогасительные устройства (камеры) *3*. Маслонаполненный ввод (проходной изолятор) служит для проведения токоведущей цепи, находящейся под высоким напряжением, через металлическую стенку или другие преграды. Траверса *4* перемыкает выходные контакты *11* камер (рис. 18.3). Горячие ионизированные выхлопные газы, выходящие из камер, могут вызвать перекрытие с камер на бак. Для предотвращения этого явления имеется баковая изоляция *5* (рис. 18.2).

Перемещение траверсы *4* происходит под действием штанги *6*, движущейся по направляющим *7* под действием пружин механизма и пружин камер *10* (рис. 18.3).

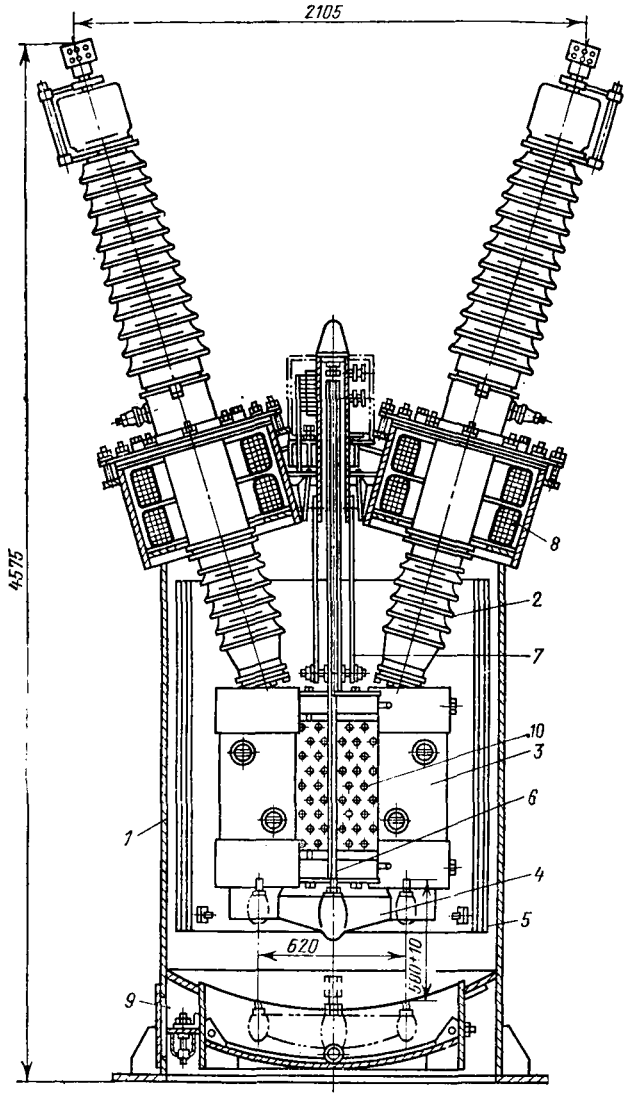


Рис. 18.2. Баковый масляный выключатель:
$U_{ном}$ = 110 кВ; $I_{ном}$ = 2000 А; $I_{0,ном}$ = 40 кА

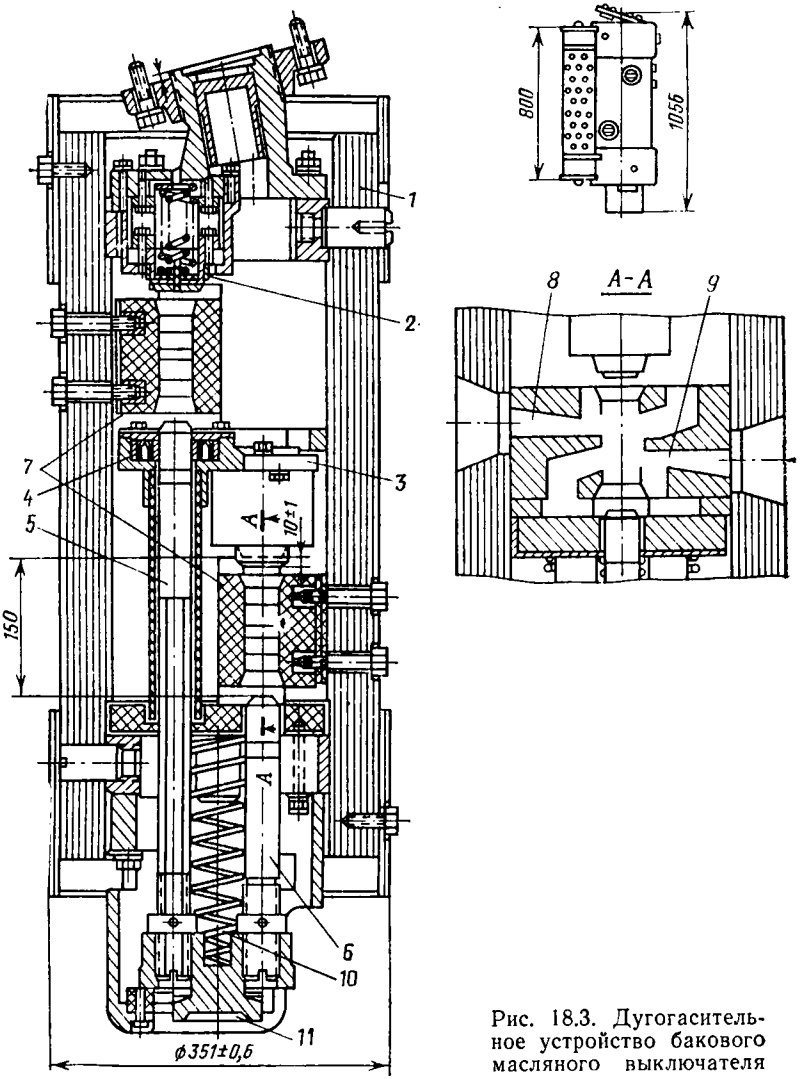


Рис. 18.3. Дугогасительное устройство бакового масляного выключателя

На выключателе установлены магнитопроводы *8* (рис 18.2) со вторичными обмотками трансформаторов тока (в данном случае их четыре). Первичной обмоткой трансформаторов являются токоведущие стержни вводов *2*. Для сохранения вязкости трансформаторного масла при низких температурах предусмотрен электрический подогрев масла устройством *9*.

Дугогасительное устройство выключателя показано на рис. 18.3. В прочном стеклоэпоксидном цилиндре *1* расположены неподвижные контакты *2* и *3*. Неподвижные контакты *2* и *3* выполнены в виде многоламельного торцевого контакта. Промежуточный контакт *4* сделан в виде сквозной розетки. Для уменьшения износа контакты облицованы металлокерамикой. Камера имеет два разрыва. Первый образуется между контактом *2* и промежуточным подвижным контактом *5*, второй — между контактом *3* и контактом *6*. Дугогасительная решетка *7* имеет два следующих друг за другом дутьевых канала *8*, *9*. Во включенном положении эти каналы перекрыты телом подвижных контактов *5* и *6*. Вся внутренняя полость камеры заполнена трансформаторным маслом. При отключении контакты движутся вниз под действием пружины камеры *10*. В каждом разрыве образуется дуга. По действием энергии дуги масло разлагается на водород, метан и другие газы. В течение сотой доли секунды давление возрастает до 5—8 МПа. Необходимо отметить, что в момент прохождения тока через нуль дуга гаснет и подвод мощности к ней прекращается. Однако энергия, выделенная дугой на протяжении предыдущего полупериода, создает в камере объем газа, в котором запасена определенная энергия. Этот газ находится под высоким давлением. К моменту нуля тока это давление уменьшается, однако остается еще достаточно большим, чтобы создать газовый поток, охлаждающий дугу и восстанавливающий электрическую прочность дугового промежутка. После того как тело подвижного контакта откроет дутьевую щель *8*, создается поток газов и паров масла, охлаждающих и деионизирующих дугу. Следует отметить, что энергия, необходимая для гашения, выделяется самой дугой. Поэтому чем больше ток, тем больше давление в камере и интенсивнее гашение дуги. При токах, близких к номинальному току отключения, длительность дуги не более 0,02 с. Наибольшая длительность горения дуги наблюдается при небольших индуктивных токах (500—2000 А). На рис. 18.3, показано сечение решетки, повернутое на 90°

относительно оси. Процесс деионизации начинается в дутьевой щели *8*. Для обеспечения надежной работы камеры во всем возможном диапазоне токов предусмотрена вторая дутьевая щель *9*. Выравнивание распределения напряжения между камерами и облегчение отключения емкостных токов обеспечиваются шунтирующими резисторами *10* (рис. 18.2). Отключение шунтирующих резисторов производится двумя разрывами, образующимися между выходными контактами камер и траверсой. В настоящее время баковые выключатели выпускаются на напряжение 35—220 кВ. Наибольшая мощность отключения 25 000 МВ·А.

Обычно бак выключателя заполняется маслом примерно на 2/3 объема. При отключении газ, выбрасываемый из камеры, заставляет слои масла, лежащие над камерами, двигаться с большой скоростью вверх. Воздух, находящийся над маслом, может свободно выходить в атмосферу. Таким образом удается ограничить давление в баке. После отключения масло, двигаясь по инерции, ударяет в крышку выключателя. Этот удар может быть столь сильным, что деформируются крепления бака к фундаменту. Фундамент выключателя должен быть рассчитан на эти нагрузки.

В случаях повреждения механизма или камер выключателя образуется длительно горящая «стоячая» дуга, при этом давление в баке может подняться до опасной величины. Взрыв бака является тяжелой аварией, так как выливающееся из него масло может воспламениться и вызвать пожар в распределительном устройстве. Для предотвращения взрыва бака в его крышке расположены аварийные выхлопные трубы с калиброванными мембранами. При определенном давлении мембраны разрушаются и из выключателя выливается масло, благодаря чему давление в баке снижается до безопасных пределов.

На протяжении многих десятков лет конструкция баковых выключателей улучшалась в направлении уменьшения массы, объема, увеличения отключающей способности. Основными достоинствами этих выключателей являются высокая надежность, простота конструкции камер и механизма, высокая механическая прочность элементов (камер, бака, механизма, вводов), что позволяет использовать эти аппараты в самых тяжелых условиях эксплуатации (при низких температурах необходим подогрев масла для уменьшения его вязкости). По отечественной статистике надежность баковых выключателей выше надежности воздушных и маломасляных выключателей. Большим достоин-

ством их является возможность использования встроенных трансформаторов тока и емкостных делителей напряжения. Простота конструкции не требует высокой квалификации обслуживающего персонала и сложного оборудования. При напряжениях до 220 кВ баковые выключатели по номинальному току отключения не уступают воздушным.

К недостаткам выключателей следует отнести: большие габариты и масса, необходимость периодической очистки масла, что требует наличия специализированного масляного хозяйства; сложность и трудоемкость ремонта и ревизии выключателей с напряжением 110 кВ и выше. Большим недостатком является взрыво- и пожароопасность баковых выключателей. В перспективе они будут заменяться маломасляными и элегазовыми.

18.3. МАЛОМАСЛЯНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

В маломасляных выключателях с целью уменьшения габаритных размеров и массы изоляция в основном осуществляется твердыми материалами. Широко распространены маломасляные выключатели серии ВМП-10 (выключатель масляный подвесного типа), предназначенные для работы при номинальном напряжении 10 кВ. Номинальный ток в зависимости от контактной системы изменяется от 600 до 3200 А. Номинальный ток отключения достигает 31,5 кА при напряжении 10 кВ, номинальная мощность 550 МВ·А. Полное время отключения примерно 0,12—0,13 с при номинальном токе отключения.

Контактная система, ДУ и устройство, превращающее вращательное движение рычагов в поступательное движение контактов, смонтированы в виде единого блока полюса *1* (рис. 18.4). Этот блок с помощью опорных изоляторов *2* крепится к стальной раме *3*. В верхней головке полюса *8* расположены подвижный контакт и механизм, в нижней *9* — неподвижный контакт. В раме установлены вал выключателя *5*, отключающая пружина, пружинный буфер включения и масляный буфер отключения *6*. Вал *5* связан с выходным рычагом механизма полюса *7* с помощью прочной изоляционной тяги *4*.

При включении изоляционная тяга *4* поворачивает выходной рычаг полюса *7* против часовой стрелки и производит замыкание контактов. Отключающая пружина при этом растягивается, а пружинный буфер включения сжимается. Этот буфер развивает большую силу на небольшом ходе,

соответствующем ходу подвижного контакта в розетке, и создает необходимую для гашения дуги скорость перемещения подвижного контакта.

Разрез нижней части блока полюса представлен на рис. 18.5. Для уменьшения обгорания концы ламелей розеточного контакта *1*, подвергающиеся воздействию дуги, облицованы металлокерамикой (§ 3.3). Нижняя головка *2* имеет съемную крышку *3*, на которой и укреплен розеточный контакт *1*. При ревизиях и ремонтах съемная крышка *3* вы-

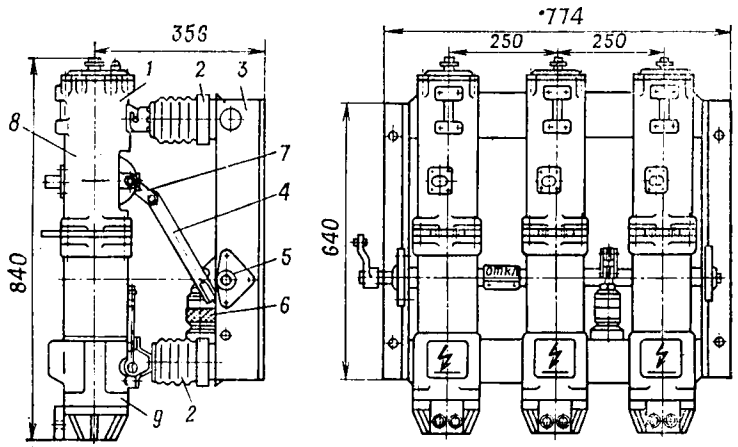


Рис. 18.4. Маломасляный выключатель ВМП-10; $U_{ном}=10$ кВ; $I_{ном}=600$ А; $I_{о,ном}=20$ кА

нимается вместе с розеточным контактом *1*. ДУ газового дутья заключено в стеклоэпоксидный цилиндр *4*. ДУ собирается из пластин фибры, гетинакса и электрокартона, в которых вырезаны отверстия, образующие каналы и полости для гашения дуги. Каждый из трех каналов (один из них виден на рис. 18.5) вначале идет горизонтально, а затем вертикально. Все пластины ДУ стягиваются фибровыми или текстолитовыми шпильками. Камера заполнена трансформаторным маслом *7*.

Для ограничения давления при больших токах и создания необходимого давления вблизи нулевого значения тока ДУ имеет воздушный буфер *А* (рис. 18.5). Давление в ДУ достигает наибольшего значения вблизи максимального значения тока. Под действием этого давления масло сжи-

мает воздух в буфере, в нем аккумулируется энергия. При приближении тока к нулю мощность в дуге и давление резко уменьшаются. Энергия, накопленная в буфере, позволяет создать вблизи нуля тока такое давление, которое необходимо для гашения дуги.

Под действием дуги, возникающей при расхождении контактов, масло разлагается и образующиеся газы создают в камере давление. В тот момент, когда тело подвижного контакта *6* (свеча) откроет первую щель, возникает газовое дутье, и при прохождении тока через нуль возможно гашение дуги. Обдув дуги газами еще более усилива-

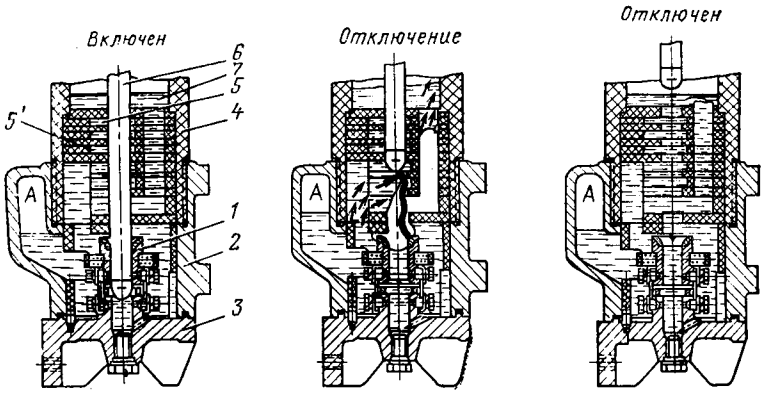


Рис. 18.5. Нижняя часть полюса выключателя ВМП-10

ется после открытия свечей второго и третьего каналов. Обычно гашение дуги с большим током происходит после открытия первых двух щелей.

При отключении малых токов в камере ДУ давление невелико и дуга не гаснет после открытия всех трех щелей, а затягивается в масляные карманы *5* в верхней части ДУ. Когда подвижный контакт, поднимаясь вверх, входит в первый снизу карман *5'*, под действием дуги масло в кармане разлагается и газы стремятся выйти вниз, охлаждая дуговой промежуток. Процесс усиливается по мере включения новых карманов. В результате удается надежно отключать критические токи (1—2 кА).

Газы, образующиеся в процессе гашения дуги, выходят через зигзагообразный канал в верхней головке полюса.

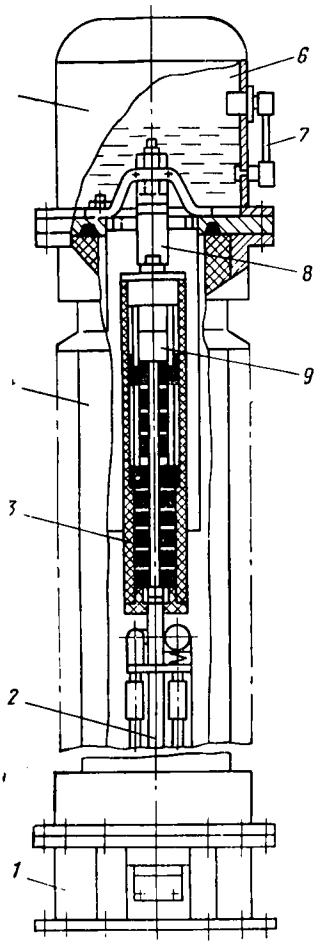


Рис. 18.6. Верхняя часть полюса выключателя ВМТ-110

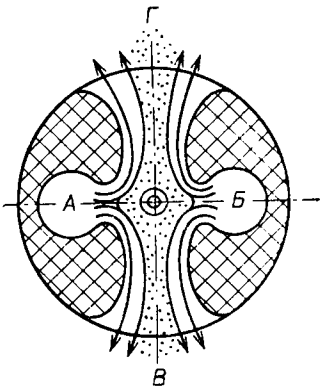


Рис. 18.7. Дугогасительная камера встречно-поперечного дутья

Во избежание выброса масла из полюса в его верхней части установлен специальный маслоотделитель.

При напряжении 110 и 220 кВ пока еще широко используются баковые выключатели с номинальным током отключения 20—40 кА. В 75 % случаев ток КЗ не превышает 20 кА и замена их маломасляными выключателями может дать большой технико-экономический эффект.

Созданы маломасляные выключатели серии ВМТ на на-

пряжение 110 и 220 кВ с номинальным током 1000 А и номи нальным током отключения 20 кА. Время отключения 0,08 время включения 0,15 с. Эти выключатели работают в цик ле АПВ со временем бестоковой паузы 0,3 с. В трехфазном выключателе ВМТ на напряжение 110 кВ (рис. 18.9) вклю чение всех трех полюсов производится одним пружинным приводом. Верхняя часть одного полюса показана на рис 18.6. На этом рисунке *1* — нижний токоподвод, *2* — подвиж ный контакт круглого сечения, *3* — дугогасительная каме ра, *4* — изолятор, *5* — колпак, *6* — расширительный объем *7* — маслоуказатель, *8* — верхний токоподвод, *9* — непо движный контакт. Внутренняя полость ДУ герметизирова на, и наверху находится расширительный объем *6*, в кото ром имеется воздух или азот при давлении 0,5—1 МПа. При отключении емкостных токов ненагруженных линий (§ 4.10) наличие расширительного объема облегчает гашение дуги, так как масло воздействует на дугу под давлением 0,5— 1 МПа. Сама дуга из-за малости тока не может создать не обходимое давление газа.

ДУ выключателя залито трансформаторным маслом. При отключении контакт *2* движется вниз и между контак тами *2* и *9* загорается электрическая дуга. В камере быстро поднимается давление. В выключателе используется каме ра встречно-поперечного дутья (рис. 18.7). Под давлением образовавшихся газов масляный поток подводится из ка налов *А* и *Б* перпендикулярно дуге. При соприкоснове нии с дугой масло образует газопаровую смесь, кото рая вытекает через дутьевые щели *В* и *Г*. При этом столб дуги интенсивно охлаждается и дуга гаснет за 0,02— 0,03 с.

В выключателе применен оригинальный механизм при вода контактов (рис. 18.8). Стальные тросы *3* обвивают шкив *1*, сидящий на главном валу *2* механизма управления (на него действуют отключающие пружины и включающий привод). Тросы *3* связаны со стеклопластиковыми тягами *4*, которые перемещают подвижный контакт *8*. Плавный останов механизма в крайних положениях осуществляется масляным *5* и резиновым *9* буферами. Верхние концы тяг *4* связаны с тросом *7*, который перекатывается по блоку *6*. Простой и легкий механизм позволяет получить высокий КПД и сообщить контактам скорость при включении до 9 м/с, что обеспечивает надежную работу выключателя в режиме АПВ. При этом требуется пружинный привод с от носительно небольшой работой включения (2300 Дж). За-

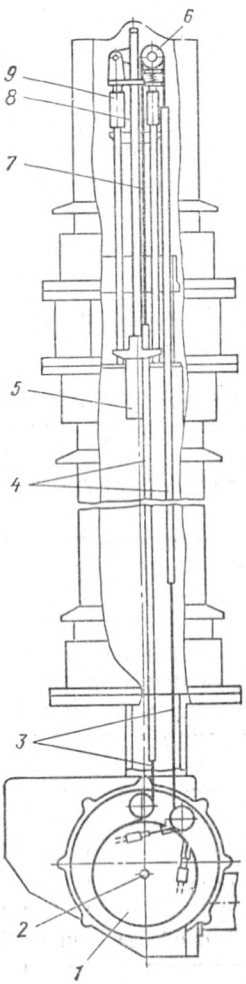


Рис. 18.8. Механизм привода контактов выключателя ВМТ-110

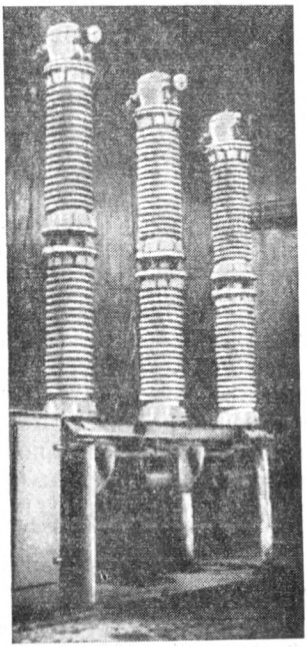


Рис. 18.9. Общий вид выключателя ВМТ-110

водка включающих пружин выключателя за время 20 с производится электродвигателем мощностью 1,1 кВт.

Для обеспечения работы при низких температурах (до —60 °С) выключатель снабжен электроподогревающим устройством. Общий вид выключателя дан на рис. 18.9. Выключатель на напряжение 220 кВ имеет два разрыва на полюс. Каждый полюс смонтирован на отдельной раме. Номинальный ток отключения выключателя 20 кА.

При напряжении выше 220 кВ целесообразно применение нескольких разрывов, соединенных последовательно. В настоящее время маломасляные выключатели с такой компоновкой строятся на напряжение до 500 кВ.

По сравнению с баковыми и воздушными маломасляные выключатели обладают следующими преимуществами:

1. Они имеют меньшие массу и габаритные размеры при малом объеме масла.

2. ДУ всегда готово к работе независимо от наличия сжатого воздуха.

3. Осмотр и ремонт дугогасительных камер и контактов возможен без слива масла, что обеспечивает удобство эксплуатации.

4. Путем применения унифицированных узлов выключатель довольно легко можно выполнить на напряжение до 500 кВ.

Однако эти выключатели имеют и недостатки:

1. Они менее надежны в работе, чем баковые. Изоляционные детали—рубашки, опорная изоляция—подвергаются повышенным механическим нагрузкам. Номинальный ток отключения маломасляных выключателей пока ниже, чем у баковых.

2. Маломасляные выключатели, как правило, не допускают установки встроенных трансформаторов тока.

Благодаря своим преимуществам маломасляные выключатели найдут широкое распространение в установках с напряжением 6—10 кВ.

При напряжении 35—220 кВ масляные выключатели будут вытесняться вакуумными и элегазовыми.

18.4. ПРИВОДЫ МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

а) **Механизм привода выключателя.** Для обеспечения дугогашения подвижный контакт выключателя при отключении должен обладать определенной линейной скоростью (1,5—10 м/с). Как правило, контакты выключателей движутся поступательно, а звенья, передающие усилия контактам от пружин или привода, имеют вращательное движение. Механизм, преобразующий вращательное движение в поступательное, называется прямилом. Механизм, широко применяемый в баковых выключателях, показан на рис. 18.10, *а*.

Отключающая пружина обычно устанавливается на каждом полюсе и действует на приводную тягу B_0C_0, стремясь переместить ее слева направо. Во включенном положении четырехзвенник $A_1C_2B_2A_2$ находит-

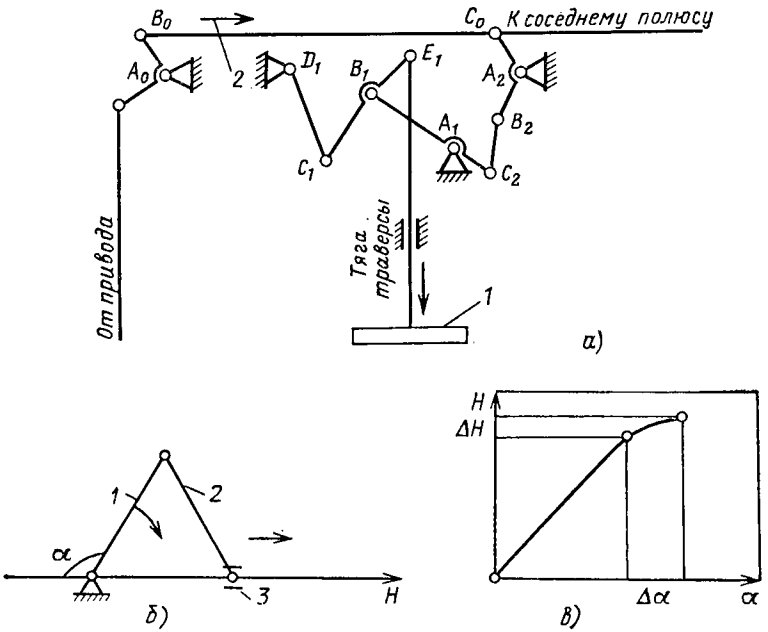


Рис. 18.10. Механизм масляного выключателя:

а — механизм бакового выключателя; *б* — кривошипно-шатунный механизм; *в* — зависимость перемещения контакта H от угла поворота α

ся в положении, близком к мертвому, которое широко используется для получения необходимой характеристики аппарата. Рассмотрим простейший кривошипно-шатунный механизм (рис. 18.10, *б*). С рычагом *1* (кривошипом) связан выходной вал выключателя, а с ползуном *3* подвижный контакт. При вращении рычага *1* контакт совершает возвратно-поступательное движение. При угле поворота, близком к 180°, и относительно большом изменении угла $\Delta\alpha$ перемещение ΔH близко к нулю (звенья *1* и *2* лежат на одной прямой). В этом случае никакая сила, действующая на ползун *3* влево, не может переместить механизм. Это положение получило название мертвого. Зависимость хода контактов H от угла поворота α приведена на рис. 18.10, *в*. Использование мертвого положения дает возможность:

1) уменьшить момент или усилия на включающем элементе к концу процесса включения, когда усилия пружин наибольшие и к ним прибавляются электродинамические усилия при включении на КЗ;

2) облегчить регулировку выключателя, так как малому ходу контактов соответствует большой ход включающего рычага или тяги;

3) преодолеть электродинамические силы, действующие на подвижные контакты, которые создают большие усилия на привод;

4) уменьшить усилия отключающих катушек и механизма свободного расцепления (рис. 18.12).

б) **Особенности привода масляных выключателей на напряжение 110 кВ и выше.** При включении на существующее КЗ дуга загорается до соприкосновения контактов и существует до момента их соединения. При этом контактные поверхности могут частично расплавляться, что ведет к их привариванию при замыкании. Кроме того, вызванные дугой при включении разложение и испарение масла могут препятствовать ее гашению при последующем отключении. Возникновение дуги при включении создает давление газа внутри ДУ, которое может снижать скорость контакта на самом ответственном участке пути. Как показывают экспериментальные исследования, длительность горения дуги при включении не должна превышать 0,005 с.

В настоящее время применяются ручной, электромагнитный, пружинный, пневматический и пневмогидравлический приводы.

в) **Ручные приводы.** При ручном приводе используется мускульная сила человека. Уменьшение усилия, необходимого для включения, достигается применением рычажных систем. Эти приводы применяются только для маломощных выключателей с напряжением 6—10 кВ.

Уменьшение обгорания контактов с помощью их облицовки металлокерамикой облегчает включение привода при существующем КЗ и позволяет увеличить номинальный ток включения.

При ручных приводах невозможно дистанционное включение выключателей. Поэтому широкая автоматизация подстанций ограничивает их применение.

г) **Электромагнитные приводы.** Электромагнитный привод ПС-10 (рис. 18.11) предназначен для выключателей с максимальным статическим моментом на валу не более 400 Н·м. Вал привода через муфту *1* и рычажную передачу соединяется с валом выключателя. Включение производится броневым электромагнитом постоянного тока с якорем *2* и катушкой *3*. Применение броневого электромагнита позволяет получить большой ход якоря и большую силу тяги в конце хода, что необходимо для преодоления противодействующих сил выключателя. При наладке ручное включение производится с помощью рычага *4*.

На рис. 18.12 изображена серия положений механизма привода. Вал *1* привода связан с валом выключателя. Звено *11* опирается на упор *8*. Этот упор регулируется так, что звенья *10* и *11* находятся в положении, «заваленном» за мертвую точку. В результате центр O_1 является неподвижным, так как силы, действующие на него, прижимают звено *11* к упору *8*. Направление момента сил, создаваемых пружинами выключателя, указано на рис. 18.12, *а*.

При подаче напряжения на включающий электромагнит шток *6* да-

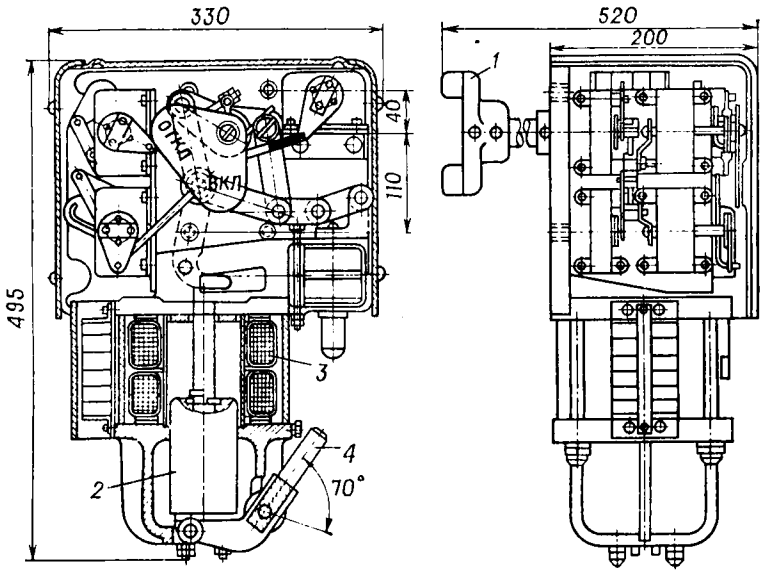


Рис. 18.11. Электромагнитный привод масляного выключателя

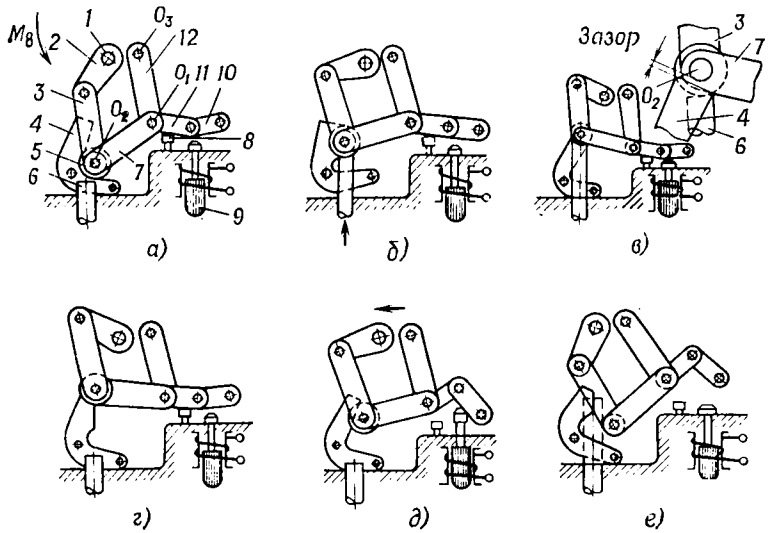


Рис. 18.12. Работа механизма свободного расцепителя

вит на ролик *5* и поворачивает рычаг *2* и звенья *3*, *7* в положения, указанные на рис. 18.12, *б* и *в*. При этом звено *12* и центр O_1 остаются неподвижными.

Во включеном положении (рис. 18.12, *г*) ось O_2 через ролик *5* опирается на защелку *4*. Почти весь момент, развиваемый пружинами выключателя, уравновешивается реакцией защелки *4*, действующей на ось O_2. Лишь небольшое усилие передается на центр O_1.

При подаче напряжения на электромагнит отключения *9* его шток выводит звенья *10* и *11* из положения, «заваленного» за мертвую точку, и центр O_1 становится подвижным — механизм получает вторую степень свободы. Под действием пружин выключателя ось O_2 соскальзывает с защелки *4*, и происходит отключение выключателя (рис. 18.12, *д*). В конце отключения все рычаги с помощью специальных пружин возвращаются в положение, показанное на рис. 18.12, *а*.

Механизм позволяет произвести отключение выключателя не только при полностью включенном положении, но и практически при любом промежуточном. Для уменьшения габаритных размеров электромагнитов плотность тока в обмотках достигает 50 А/мм². Поэтому схема управления автоматически отключает электромагниты в конце включения и отключения.

При включении на существующее КЗ привод должен включить выключатель только 1 раз, так как при следующих друг за другом включениях ДУ оказывается неподготовленным к отключению тока КЗ. Поэтому предусматривается механическая блокировка против многократного включения. Если после выключения остается поданным сигнал на включение, включающий электромагнит срабатывает. Но в этот момент ролик *5* не опирается на шток *6*, механизм привода не сложился еще для включения. Поэтому электромагнит включается вхолостую (рис. 18.12, *е*).

Привод обеспечивает нормальную работу при напряжении на включающем электромагните в пределах 80—110, а для отключающего электромагнита 65—120 % номинального значения.

Выбор привода и оценка его работоспособности проводятся для наиболее тяжелых режимов эксплуатации. При расчетах рассматривается случай включения на КЗ при пониженном напряжении на электромагнитах и максимальной температуре окружающей среды (сопротивление обмоток максимально). Электромагнитные приводы характеризуются простотой конструкции и эксплуатации, высокой надежностью, согласованностью характеристик привода и противодействующих сил выключателя. Недостатками этих приводов являются большое время включения (для мощных выключателей до 1 с), большое потребление энергии, необходимость мощных аккумуляторных батарей для питания электромагнитов. Питающие кабели должны иметь значительное

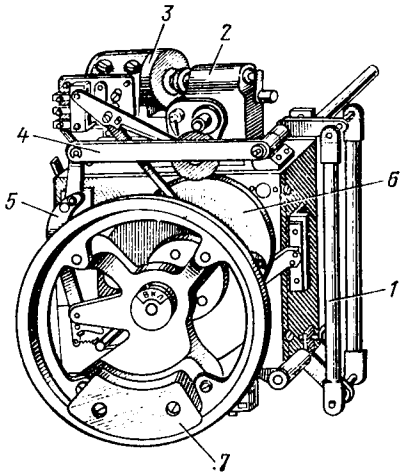


Рис. 18.13. Пружинно-грузовой привод масляного выключателя

сечение. Вследствие указанных недостатков электромагнитные приводы рекомендуются для выключателей небольшой мощности.

д) **Пружинные приводы.** В пружинном приводе энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя малой мощности (менее 1 кВт).

Особенностью тяговой характеристики привода является уменьшение усилия, развиваемого включающими пружинами к концу хода, вследствие уменьшения их деформации. Для уменьшения такого эффекта начальная избыточная энергия пружин преобразуется в кинетическую энергию специального груза. К концу включения, когда скорость падает, энергия, накопленная в грузе, передается механизму выключателя.

Широко распространен универсальный пружинно-грузовой привод ПП-67 (рис. 18.13). Включающие пружины *1* растягиваются с помощью электродвигателя *3*, редуктора *2* и зубчатой передачи *6*. Пружины соединяются с валом привода через систему рычагов *4* и *5*, которые позволяют получить необходимый момент, несмотря на уменьшение силы пружин к концу хода. При взведении привода секторообразный груз *7* поворачивается на 180° в верхнее положение. При включении груз создает дополнительный вращающий момент, который достигает наибольшего значения после поворота вала примерно на 90°.

Пружинные приводы позволяют осуществить цикл АПВ. После включения выключателя автоматически производится взведение включающих пружин и привод подготавливается к повторному включению. Время включения выключателя с таким приводом составляет 0,2—0,35 с.

Привод снабжен электромагнитными элементами защиты, которые реагируют либо на ток, либо на напряжение. Эти элементы воздействуют на расцепляющее устройство механизма привода.

Пружинный привод не требует мощной аккумуляторной батареи и связанных с ней затрат, что является его преимуществом по сравнению с электромагнитным приводом. По сравнению с пневматическим и гидропневматическим пружинный привод более прост по конструкции.

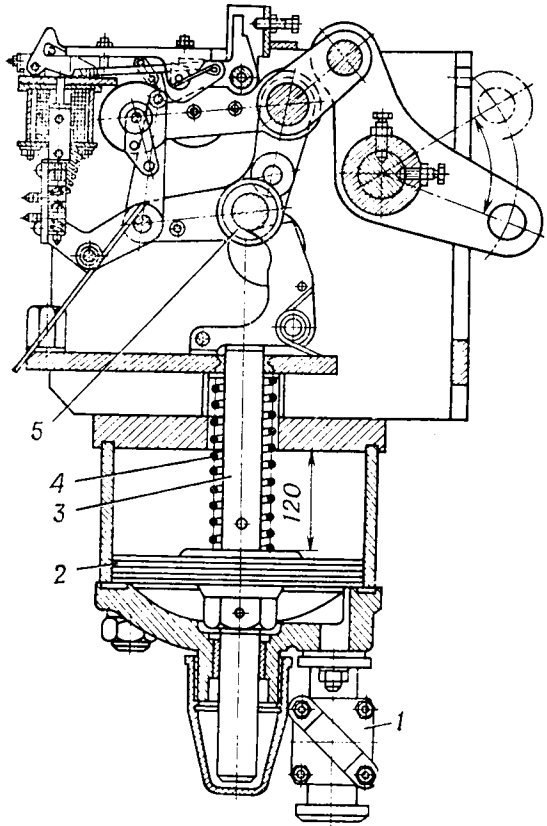


Рис. 18.14. Пневматический привод масляного выключателя

В нем отсутствуют резервуары со сжатым воздухом или газом, компрессоры, сложная пневматическая или гидравлическая системы управления.

Благодаря этим преимуществам можно ожидать широкого распространения пружинных приводов в маломасляных выключателях на напряжения вплоть до 500 кВ. Необходимая зависимость тягового усилия от хода контактов может быть получена применением кулачкового механизма и специальных маховиков, позволяющих более полно использовать энергию включающих пружин.

е) Пневматические приводы. На рис. 18.14 показан пневматический привод для мощных баковых выключателей напряжением 220 кВ.

При откр ытии клапана *1* сжатый воздух при давлении 0,8—1 МПа

воздействует на поршень *2*. Шток поршня *3* через ролик *5* производит включение выключателя. После включения полость под поршнем сообщается с атмосферой, и он возвращается в начальное положение под действием пружины *4*.

Пневмопривод широко применяется для маломасляных выключателей. Бак со сжатым воздухом и привод встраиваются в конструкцию выключателя. Сжатый воздух подводится от централизованной компрессорной установки.

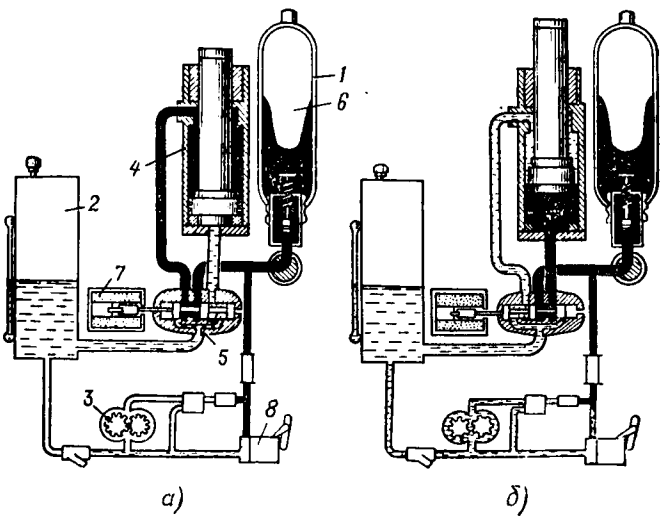


Рис. 18.15. Пневмогидравлический привод

Пневматический привод имеет ряд преимуществ перед электромагнитным: высокое быстродействие (время включения 0,25 с для мощных выключателей), отсутствие мощных аккумуляторных батарей и др. В настоящее время пневмоприводы начинают использоваться для включения разъединителей и других аппаратов. Для надежной работы привода необходимы очистка и сушка воздуха [18.2].

ж) **Пневмогидравлический привод.** В пневмогидравлическом приводе (рис. 18.15) аккумулирование энергии, необходимой для включения, осуществляется за счет сжатия газа под большим давлением. Для исключения утечки и растворения газ заключен в эластичном резиновом баллоне, размещенном в стальном сосуде *1*. Обычно в пневмогидравлических приводах используется азот.

При работе насоса *3* масло нагнетается в сосуд *1* и резиновый бал-

лон *6* с азотом сжимается. Давление доводится до номинального значения 15 МПа, после чего насос *3* останавливается.

Управление приводом осуществляется с помощью золотникового клапана *5*, который приводится в действие электромагнитом *7*. При левом положении клапана (рис. 18.15, *а*) масло подается на верхнюю поверхность поршня. Нижняя поверхность поршня сообщается с маслом, находящимся под атмосферным давлением в резервуаре *2*. При переходе золотника в правое положение (рис. 18.15, *б*) масло под давлением будет подано на нижнюю поверхность поршня, поршень переместится вверх, и произойдет включение выключателя. Масло из верхней части цилиндра свободно перетекает в резервуар *2*.

Привод применяется и в маломасляных выключателях. В этом случае главный цилиндр *4*, связанный с контактным механизмом, находится под высоким потенциалом. Управление осуществляется с помощью двух маслопроводов, связывающих главный цилиндр с остальной частью привода. Такая система позволяет отказаться от рычажной передачи, значительно облегчить подвижную часть выключателя, а следовательно, уменьшить необходимое усилие отключающих пружин. Для наладочных работ с выключателями используется ручной насос *8*.

Нормальная работа пневмогидравлического привода возможна, если вязкость жидкости не меняется с температурой.

Пневмогидравлический привод обладает высоким быстродействием, большой надежностью, удобством в эксплуатации. По своим характеристикам он превосходит пневматический привод. Пневмогидравлический привод найдет применение для мощных выключателей с напряжением 110 кВ и выше.

18.5. ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

а) **Выключатель с открытым отделителем.** На рис. 18.16 упрощенно показан воздушный выключатель типа ВВП-35 для электротермических установок. Параметры выключателя: номинальное напряжение 35 кВ, номинальный ток 1250 А, номинальный ток отключения 20 кА, время отключения 0,08 с, номинальное давление 2 МПа. Особенностью выключателя является возможность многократной коммутации номинального тока. Принципиальной особенностью ВВП-35 является наличие отделителя *1*, включенного последовательно с ДУ *3*. В ДУ продольного дутья ток отключения зависит от отношения l/d, где l — расстояние между контактами, d — диаметр сопла ДУ. Для одностороннего сопла наибольшее значение тока отключения достигается при $l/d=0{,}33$. Диаметр сопла d определяется значением тока отключения. После отключения обычно в ДУ устанавливается атмосферное давление и расстояние $l=0{,}33\,d$ может пробиваться восстанавливающимся напряжением. Поэтому последовательно с ДУ включается отделитель, назначение ко-

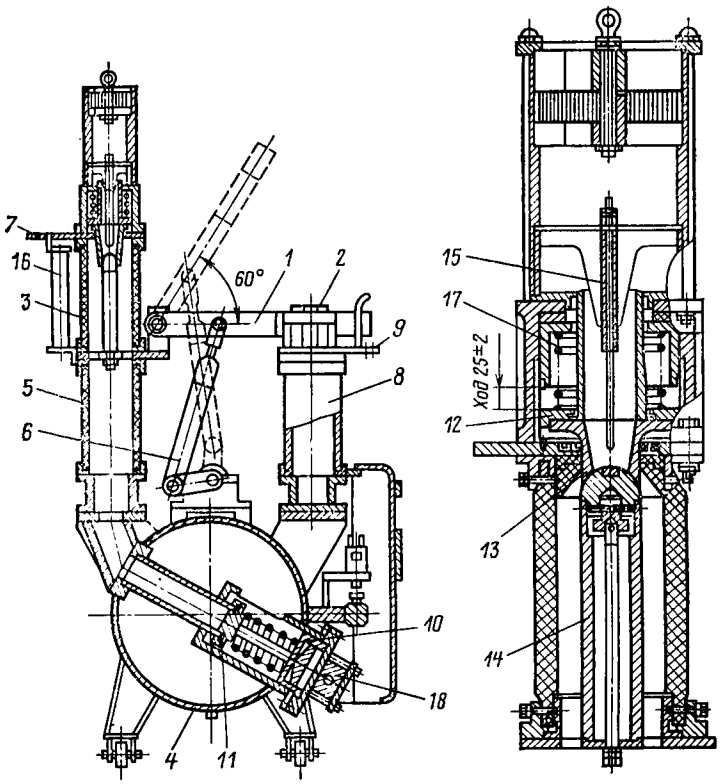


Рис. 18.16. Выключатель типа ВВП-35

Рис. 18.17. Дугогасительное устройство выключателя ВВП-35

торого создавать надежный изоляционный промежуток после гашения дуги и смыкания контактов ДУ. При отключении сначала расходятся контакты в ДУ и дуга гаснет, затем расходятся контакты разъединителя. После этого подача сжатого воздуха в ДУ прекращается и контакты ДУ смыкаются. Включение выключателя производится замыканием контактов отделителя *1* и *2*. Работа узлов выключателя описывается ниже.

Сжатый воздух находится в стальном баке *4*. На стеклоэпоксидной трубе *5* расположено ДУ *3*. Цепь высокого напряжения присоединяется к выводам *9* и *7*. Последовательно с ДУ включены контакты *1*, *2*. Неподвижный контакт отделителя *2* укреплен на стеклопластиковом

цилиндре *8*. Привод ножа отделителя осуществляется через изоляционную штангу *6*. Для ограничения перенапряжений, возникающих при отключении ненагруженных трансформаторов, дуговой промежуток шунтирован нелинейным резистором *16*. При отключении электромагнит воздействует на пусковой клапан *18* и сообщает с атмосферой полость справа от поршня *10*. Под действием сжатого воздуха поршень *10* перемещается вправо вниз и открывает главный клапан *11*. Сжатый воздух из бака *4* поступает по трубе *5* в ДУ. В ДУ (рис. 18.17) под действием сжатого воздуха поршень *12* вместе с подвижным трубчатым контактом *13* поднимается вверх. Дуга между контактами *13* и *14* интенсивно охлаждается сжатым воздухом. Предельная длина дуги ограничивается электродом *15*. Длительность горения дуги составляет 0,5—1,5 полупериода.

Во время работы ДУ сжатый воздух подается в привод отделителя. После погасания дуги привод переводит нож отделителя *1* в положение, обозначенное пунктиром. После отключения клапан *11* закрывается и под действием пружины *17* контакты ДУ замыкаются. Для включения выключателя изменяется направление потока сжатого воздуха, поступающего в привод отделителя, благодаря чему нож *1* и контакт *2* замыкаются. Из-за невысокой надежности отделителей такие выключатели не применяются в открытых распределительных устройствах (ОРУ). В ОРУ применяются выключатели с газонаполненным отделителем (серии ВВН), в которых контакты отделителя защищены от воздействия окружающей среды. В электротермических установках на напряжение 110 и 220 кВ используются выключатели серии ВВБ.

б) **Выключатель с воздухонаполненным отделителем.** На рис. 18.18 показан полюс выключателя серии ВВН с номинальным напряжением 330 кВ, длительным током *2* кА и номинальным током отключения 25 кА. В основании полюса расположены два бака со сжатым воздухом *1* и *3*. Дугогасительные камеры *4*, снабженные шунтирующими резисторами *5*, укреплены на полых фарфоровых изоляторах *2*, которые являются воздухопроводом. Сжатый воздух в камеры *4* подается клапаном *6*. Каждый полюс имеет восемь дугогасительных камер продольного дутья, включенных последовательно. Воздухонаполненный отделитель состоит из шести дугогасительных элементов *7*, шунтированных конденсаторами *8*.

Процесс отключения протекает следующим образом: вначале открывается клапан *6*, камеры *4* разводят контакты и отключают ток КЗ. Затем открывается клапан *9*, расходятся контакты камер отделителя *7* и разрывается ток шунтов. Во все время отключенного состояния выключателя отделитель находится под давлением 2 МПа. Эта конструкция более надежна, чем конструкция с открытым отделителем, так как здесь отделитель защищен от действия окружающей среды. Крупным недостатком выключателя является длительное нахождение фарфоро-

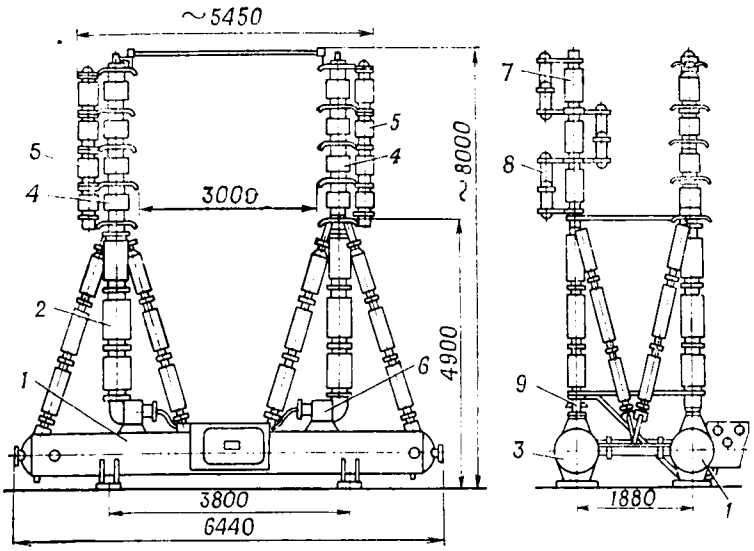


Рис. 18.18. Выключатель серии ВВН

вых изоляторов ДУ отделителя под давлением в отключенном положении выключателя.

Опыт эксплуатации показал недостаточно высокую надежность описанной конструкции, поэтому такие выключатели в настоящее время не выпускаются. В современных выключателях на напряжение 110 кВ и выше отказались от отделителей и перешли на дугогасительные камеры, которые в отключенном положении наполнены сжатым воздухом.

в) **Выключатели с дугогасительными камерами в баке со сжатым воздухом.** Наиболее совершенны воздушные выключатели, у которых дугогасительная камера размещается непосредственно в баке со сжатым воздухом. На рис. 18.19, *а* показан полюс такого выключателя серии ВВБ на напряжение 110 кВ. Бак со сжатым воздухом *1* располагается на опорном изоляторе *2*, в этом же изоляторе проходят управляющие воздухопроводы, воздух в которых находится под давлением 2,6 МПа. Шкаф управления *3* расположен в основании выключателя. ДУ соединяется с внешней цепью токоведущими частями проходных изоляторов *4*. Равномерное распределение напряжения между двумя разрывами устройства обеспечивается с помощью конденсаторов *5*. Схема устройства представлена на рис. 18.19, *б*, где *5* — шунтирующие конденсаторы, обеспечивающие равенство напряжений на двух разры-

вах устройства; *6* — основные контакты; *7* — вспомогательные; *8* — шунтирующие резисторы, служащие для снижения скорости восстановления напряжения. Ток через шунтирующие резисторы отключается контактами *7* после гашения дуги в основных разрывах *6*. Из рис. 18.19, *б* видно что корпус бака *1* находится под напряжением.

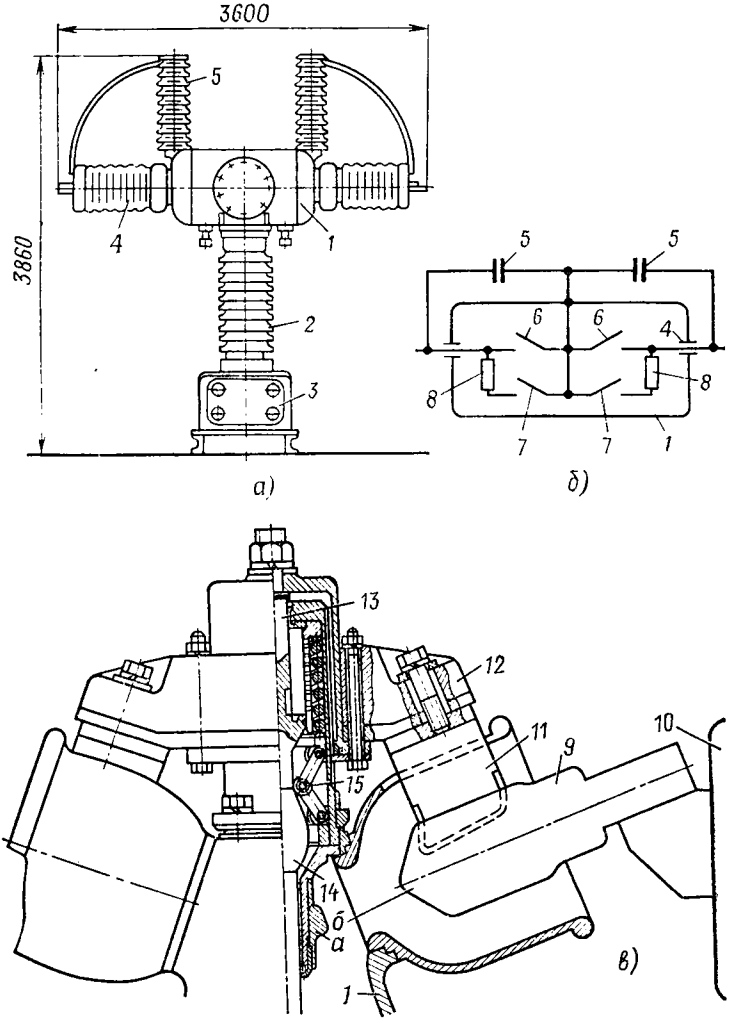


Рис. 18.19. Баковый воздушный выключатель серии ВВБ-110; $I_{о,ном}=31{,}5$ кА; $I_{ном}=2000$ А

В ДУ (рис. 18.19, *в*) неподвижный контакт *9* укреплен на конце оковедущего стержня изолятора *10*. Подвижный контакт *11* укреплен а траверсе *12*, связанной с приводным штоком *13*. Выступ *14* на штоке *3* служит для фиксации механизма ДУ во включенном положении с помощью защелок *15*.

Во включенном положении полость бака отделена от атмосферы помощью клапана, закрывающего выхлоп *1*. При отключении в привод подается сжатый воздух, под воздействием которого шток *13* перемещается вверх и открывает клапан выхлопа *1*, отделяющий полость бака от атмосферы. Дуга между контактами *11* и *9* потоком выходящего в атмосферу воздуха сдувается на точки *а* и *б*, где подвергается интенсивному продольному дутью сжатым воздухом. После отключения клапан закрывается и бак разобщается с атмосферой.

В рассмотренной конструкции под высоким давлением находится только стальной бак. Это позволяет повышать давление воздуха в баке до 3,5—4 МПа и увеличивать отключаемый ток. В выключателях серии ВВН на каждый класс напряжения создается по существу новая конструкция. Это требует больших экономических затрат на производство и эксплуатацию. В современных выключателях используется модульный принцип. ДУ на рис. 18.19, *в*, рассчитанное на напряжение 110 кВ, может использоваться при напряжении 220 кВ при том же токе отключения, но два ДУ соединяются последовательно, а опорная изоляция соответственно усиливается. На напряжение 500 кВ соединяются пять ДУ. Выключатели, используемые для расширения номинального напряжения путем последовательного их соединения, называются модулями. Перспективно также улучшение параметров каждого модуля. Так, совершенствование модуля ВВБ (повышение давления, доработка ДУ) позволило повысить номинальное напряжение со 110 до 220 кВ. При этом сокращается число разрывов выключателя в 2 раза, что дает большой технико-экономический эффект.

На базе модуля (одного полюса), изображенного на рис. 18.19, создана серия выключателей с номинальным напряжением до 750 кВ и номинальным током отключения до 40 кА. Их полное время отключения составляет 0,06—0,08 с в зависимости от номинального напряжения. Полюс выключателя на напряжение 220 кВ имеет четыре разрыва. По сравнению с серией ВВН габариты и масса выключателей серии ВВБ уменьшены на 20—30 %, а расход воздуха сокращен в 3 раза. Эксплуатация показала их высокую надежность.

Развитием этой серии выключателей является выключатель ВВБК, в котором давление воздуха поднято до 4 МПа. В результате конструктивных усовершенствований при отключении создается двустороннее несимметричное дутье, повышающее эффективность гашения дуги [18.5]. Для уменьшения времени отключения в выключателях на напряжение 220 кВ и выше пневматическая система управления заменена

механической. Номинальный ток отключения увеличен с 31,5 до 50 кА, а допустимое напряжение на разрыве с 55 до 110 кВ. Время отключения при этом снижено с 0,06—0,08 до 0,04 с. Номинальное напряжение выключателя ВВБК достигает 1150 кВ.

г) **Серия воздушных выключателей ВНВ.** Предназначена для напряжений 220—1150 кВ и тока отключения до 63 кА. Модуль на напряжение 250 кВ представлен на рис. 18.20, *а*. Основной особенностью модуля является расположение ДУ в атмосфере сжатого воздуха при давлении 4 МПа. При отключении контакты ДУ расходятся и открывается выхлопной клапан, соединяющий внутреннюю полость ДУ с атмосферой. После гашения дуги контакты остаются в разведенном состоянии, а выхлопной клапан закрывается, ДУ герметизируется. Привод контактов осуществляется с помощью легкой стеклопластиковой тяги. Расположение трех полюсов выключателя показано на рис. 18.20, *б*. На рис. 18.20: *1* — бак со сжатым воздухом; *2* — опорный изолятор; *3* — основной разрыв; *4* — конденсатор для выравнивания напряжения по разрывам; *5* — шунтирующий резистор с ДУ. Электрическая схема модуля аналогична схеме рис. 18.19, *б*. Выключатель на 500 кВ имеет два модуля, включенных последовательно, и три модуля при напряжении 750 кВ. Опорные изоляторы усиливаются соответственно классу напряжения.

В основании модуля выключателя на 500 кВ расположен бак *1* со сжатым воздухом (рис. 18.21). Сжатый воздух по трубопроводу подается в верхний бак, образованный металлическим цилиндром *9* и стеклоэпоксидным цилиндром *11* и содержащий ДУ. Главный контакт создается пальцами *19* неподвижного контакта и внешней поверхностью подвижного цилиндрического контакта *18*. Пальцы дугогасительного контакта *20* расположены в прорезях дутьевого сопла неподвижного контакта и скользят по внутренней поверхности контакта *18*. В показанном на рисунке включенном положении контакт *18* прижат к седлу *25*. Внутренняя полость контакта *18* соединяется с атмосферой через открытый выхлопной клапан *24*, а его внешняя поверхность и пальцы *19* находятся в среде сжатого воздуха. Сопло *17* подвижное. Начальное расстояние между контактом *20* и соплом *17* — оптимальное для данного сечения сопла. После гашения дуги подвижное сопло *17* перемещается под действием давления внутри ДУ вправо, садится на седло *26* и герметизирует камеру. Для уменьшения напряженности электрического поля между контактами в разведенном состоянии они окружены экранами *16*. Это позволяет поднять электрическую прочность промежутка и номинальное напряжение модуля.

При отключении срабатывает отключающий электромагнит *3*, открывающий клапан *6*. После этого сжатый воздух подается на поршень *7*, воздействующий на тягу *8*. Через звенья *5*, *4*, *2* усилие передается на изоляционные тяги *13*, которые перемещаются вниз. Звенья *15* и *37* сое-

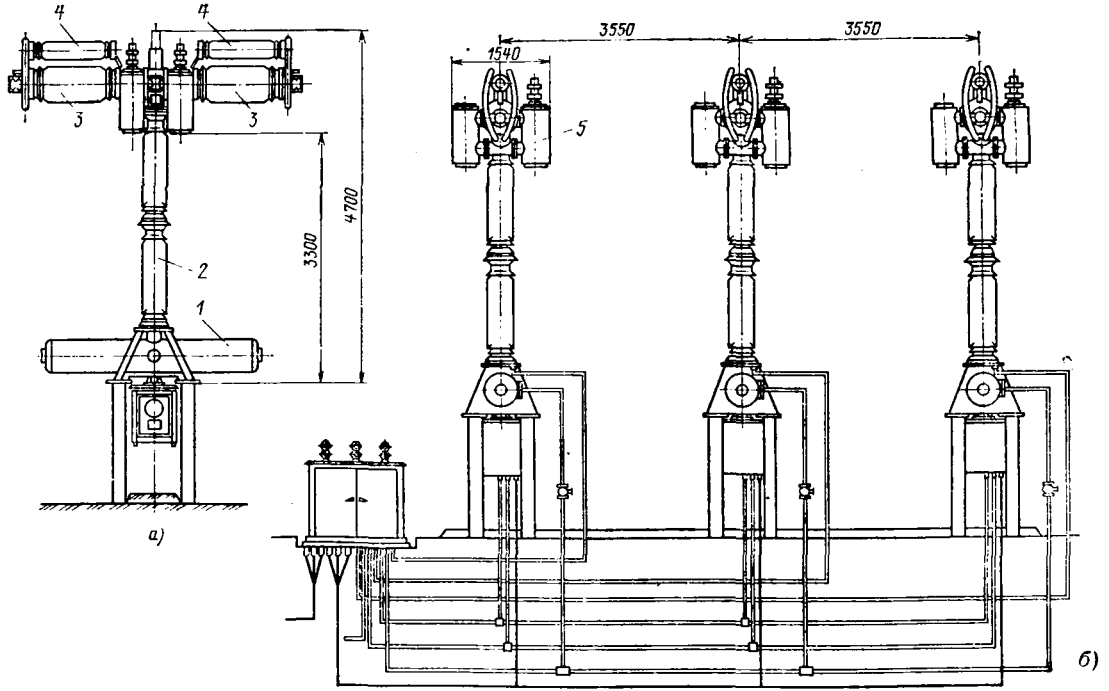


Рис. 18.20. Воздушный выключатель серии ВНВ

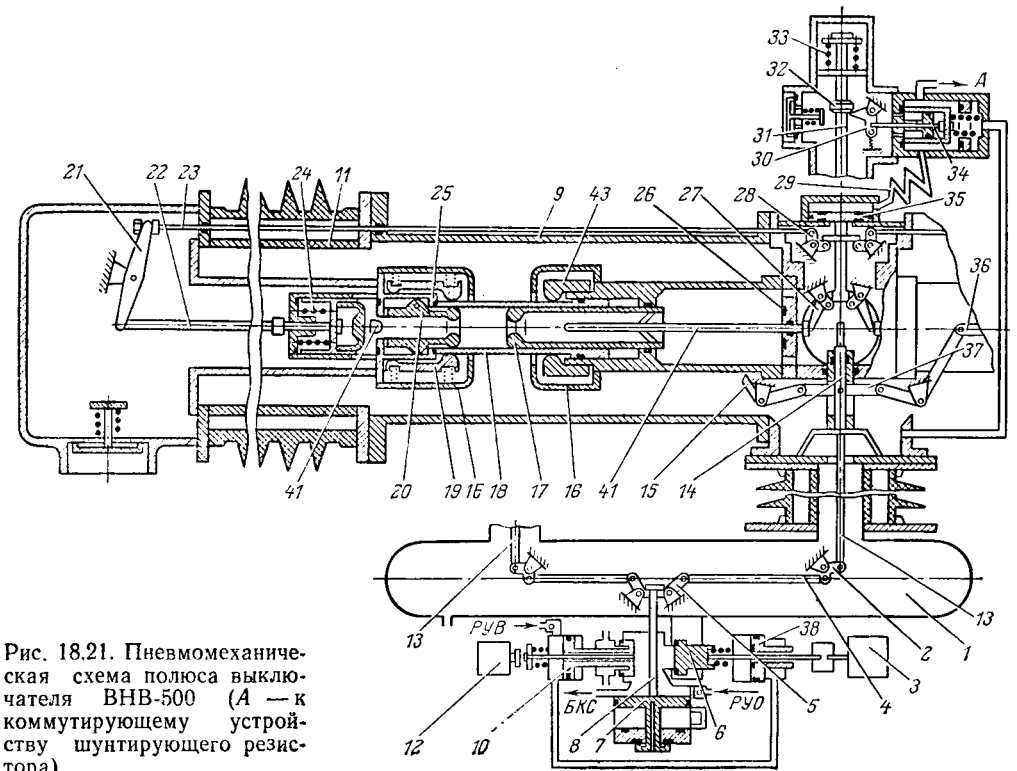


Рис. 18.21. Пневмомеханическая схема полюса выключателя ВНВ-500 (*А* — к коммутирующему устройству шунтирующего резистора)

диняются с тягой *13* трубкой *14* и перемещают горизонтальную тягу *36*, которая связана с подвижным контактом *18*. Контакт *18* сначала размыкается с пальцами *19*, а затем с пальцами *20*. Между последними и внутренней поверхностью контакта *18* загорается дуга, которая быстро перемещается воздушным потоком, вытекающим в атмосферу через дутьевое сопло неподвижного контакта и подвижное сопло *17*. Гашение дуги происходит за счет двустороннего дутья. Шток *31* связан с тягой *13*. При движении тяги *13* вниз связанный с ней шток *31* действует на рычаг *30* и открывает клапан *34*. При этом сжатый воздух, находящийся над поршнем *35*, через змеевик *29* выходит в атмосферу. Поршень *35* освобождает рычаги *27* и *28* и с помощью тяг *22*, *23* и коромысла *21* закрывает клапан *24*. Одновременно подвижное сопло *17* вместе с ограничивающим электродом *41* перемещается вправо, пока не сядет на седло *26*. Таким образом, внутренний объем ДУ герметизируется и отделяется от атмосферы. Электрод *41* ограничивает длину дуги, горящей между ним и неподвижным дугогасительным контактом *20*, что уменьшает энергию, выделяемую дугой.

При токах отключения до 40 кА выключатель не имеет шунтирующих резисторов. При токах 63 кА или тяжелых условиях восстановления напряжения используются низкоомный шунтирующий резистор и вспомогательный контактный блок для отключения резистора (рис. 18.20, поз. *5*). Контейнер с этим блоком и резистором располагается рядом с ДУ. Управление вспомогательным блоком осуществляется от клапана *34* (стрелка *А*).

При включении срабатывает электромагнит *12*. Клапан *10* открывается и соединяет полость над поршнем *7* с атмосферой. Одновременно подается сжатый воздух на поршень *38*, который отделяет полость бака от поршня *7*. Под действием заранее заведенной пружины *33* шток *32* опускается и клапан *34* закрывается. Сжатый воздух подается к поршню *35*, и он опускается, воздействуя на рычаги *28*, *27*. Клапан *24* открывается, а подвижное сопло *17* устанавливается в положение, указанное на рисунке. При этом внутренняя полость контакта *18* и сопла *17* соединяется с атмосферой. При закрытии клапана *34* сжатый воздух подается в контейнер со вспомогательным контактным блоком, который включает резистор. При движении тяги *13* вверх подвижный контакт *18* замыкается с неподвижным, одновременно поршень *7* переходит в положение, указанное на рисунке. После выхода воздуха из полости над поршнем *7* закрываются клапаны *10*, *6* и поршень *38* устанавливается в исходное положение соответствующими пружинами.

В выключателе на напряжение 1150 кВ при включении вначале замыкаются вспомогательные контакты и в цепь вводится резистор, сопротивление которого равно волновому сопротивлению коммутируемой линии. Затем примерно через 10 мс включается контакт *18*, который

шунтирует этот резистор. Это ограничивает перенапряжения при включении холостых линий электропередачи.

Выключатель имеет следующие конструктивные особенности:

1. ДУ расположены внутри прочных стеклоэпоксидных труб, являющихся баком сжатого воздуха выключателя. Такая конструкция позволяет снять с фарфора воздействие высокого давления воздуха. Фарфоровая рубашка защищает стеклоэпоксидную трубу от воздействия атмосферы.

2. Давление сжатого воздуха в ДУ достигает 4 МПа, что наряду с другими мероприятиями обеспечивает ток отключения до 63 кА при напряжении на разрыве 125 кВ.

3. ДУ имеет два разрыва. После гашения дуги дугогасительный контакт отходит на расстояние, обеспечивающее необходимую электрическую прочность промежутка, и в своем крайнем положении воздействует на выхлопной клапан ДУ. Камера ДУ герметизируется, и разведенные контакты находятся при давлении 4 МПа.

4. Привод контактов расположен на заземленном баке выключателя. Передача силы от привода к механизму контактов осуществляется механически через легкую изоляционную стеклопластиковую тягу. Это позволяет получать полное время отключения 0,04 с.

5. При тяжелых условиях восстановления напряжения параллельно каждому разрыву включается низкоомный шунтирующий резистор (40 Ом). Из конструктивных соображений резистор разбит на две части (два контейнера). Ток резистора отключается двухступенчатой контактной системой, расположенной в одном из контейнеров.

18.6. ЭЛЕГАЗОВЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

а) Свойства элегаза. Дальнейшее повышение номинального напряжения и номинального тока в воздушных выключателях наталкивается на большие трудности (давление воздуха в ДУ достигает 4 МПа, что требует больших затрат на создание механически прочной и работоспособной конструкции выключателя). Решение задачи может быть получено путем использования вместо воздуха газа, который обладал бы более высокой электрической прочностью и отключающей способностью. Таким газом является шестифтористая сера SF_6 — элегаз (электротехнический газ) [18.6]. По сравнению с воздухом этот газ обладает следующими преимуществами:

1. Электрическая прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха. При давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла.

2. Высокая удельная объемная теплоемкость (почти в 4 раза выше, чем у воздуха) позволяет увеличить нагруз-

ку токоведущих частей и уменьшить массу меди в выключателе.

3. Номинальный ток отключения камеры продольного дутья с элегазом в 5 раз выше, чем с воздухом.

4. Малая напряженность электрического поля в столбе дуги. Благодаря этому резко сокращается износ контактов, уменьшается эффект термодинамической закупорки сопла. Это позволяет увеличить расстояние между контактами, повысить напряжение на каждом контактном промежутке и допустимую скорость восстановления напряжения.

За рубежом опубликованы данные по одноразрывному выключателю на номинальное напряжение 750 кВ.

5. Элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом и водородом, слабо разлагается дугой. Элегаз нетоксичен, хотя некоторые продукты разложения опасны.

Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. Так, например, при давлении 1,31 МПа переход элегаза из газообразного состояния в жидкое происходит при температуре 0°С. Это заставляет использовать его либо с подогревающим устройством, либо при низком давлении. При давлении 0,35 МПа температура сжижения равна —40°С. Для электрических аппаратов применяется газ с высокой степенью очистки от примесей, что усложняет и удорожает его получение.

б) **Конструкция элегазовых выключателей.** Дугогасящая способность элегаза наиболее эффективна при большой скорости его струи относительно горящей дуги. Возможны следующие исполнения ДУ с элегазом:

1) с автопневматическим дутьем. Необходимый для дутья перепад давления создается за счет энергии привода;

2) с охлаждением дуги элегазом при ее движении, вызванном взаимодействием тока с магнитным полем.

3) с гашением дуги за счет перетекания газа из резервуара с высоким давлением в резервуар с низким давлением (выключатели с двойным давлением).

В настоящее время широко применяется первый способ. Дугогасительное устройство с автопневматическим принудительным дутьем показано на рис. 18.22. Оно располагается в герметичном баке с давлением элегаза 0,2—0,28 МПа. При этом удается получить необходимую электрическую прочность внутренней изоляции. При отключении дуга возникает между неподвижным *1* и подвижным *2* контактами. Вместе с подвижным контактом *2* при отклю-

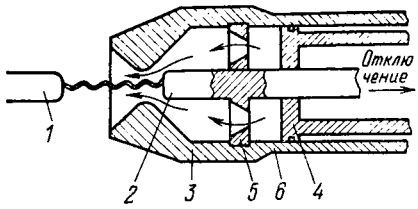


Рис. 18.22. Схема дугогасительного устройства элегазового выключателя с автопневматическим дутьем

чении перемещаются сопло *3* из фторопласта, перегородка *5* и цилиндр *6*. Так как поршень *4* при этом неподвижен, элегаз сжимается и его поток, проходя через сопло, продольно омывает дугу и обеспечивает ее эффективное гашение.

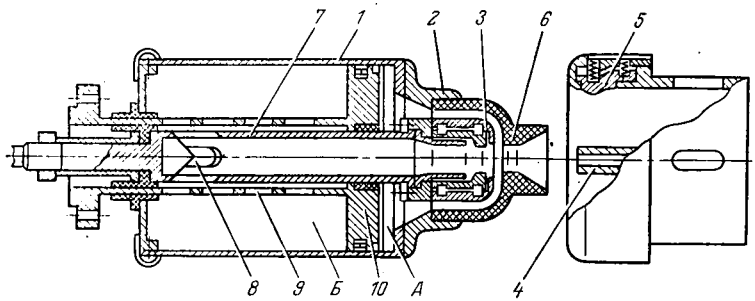


Рис. 18.23. Дугогасительная камера элегазового выключателя

Для КРУ разработан элегазовый выключатель с номинальным напряжением 110 и 220 кВ, номинальным током 2 кА и номинальным током отключения 40 кА. Время отключения 0,065, время включения 0,08 с, номинальное давление элегаза 0,55 МПа, привод пневматический с давлением воздуха 2 МПа.

Камера ДУ элегазового выключателя на 220 кВ с двумя разрывами на полюс показана на рис. 18.23. При включении выключателя цилиндр *1* вместе со связанными с ним главным *2* и дугогасительным *3* контактами перемещается вправо. При этом труба *2* входит в розетку *5*, а розетка *3* соединяется с контактом *4*. Сопло из фторопласта *6* также перемещается вправо и надвигается на полый трубчатый контакт *4*. В полость *А* засасывается элегаз, а из полости *Б* элегаз вытесняется.

При отключении цилиндр *1* и труба *7* перемещаются

злево. Сначала расходятся главные контакты (*2*, *5*), потом дугогасительные (*3*, *4*). В момент размыкания контактов *3* и *4* возникает дуга, которая подвергается обдуву газом. Поршень *10* остается неподвижным. В области *А* образуется сжатый газ, а в области *Б* — разреженный. В результате газ перетекает из области *А* через полый контакт *7* в область *Б* через отверстия *8* и *9* под действием разности давлений $p_A - (-p_Б)$. Большой перепад давлений позволяет получить необходимую (критическую) скорость обдува дуги. При тяжелых условиях отключения (неудаленное КЗ) дуга гасится также за счет ее охлаждения в сопле *6* после выхода его с контакта *4*.

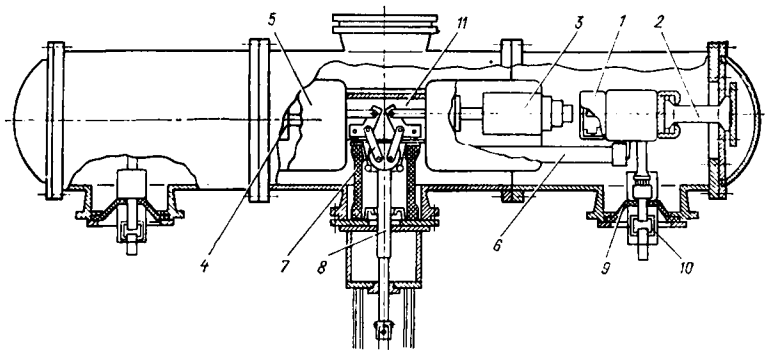


Рис. 18.24. Устройство элегазового выключателя на напряжение 220 кВ

На рис. 18.24 представлено принципиальное устройство элегазового выключателя для КРУЭ-220 на напряжение 220 кВ. Неподвижный контакт выключателя *1* прикреплен к баку выключателя на литом изоляторе *2*. Выключатель имеет два ДУ *3* и *4*, соединенных последовательно через корпус *11*. Равномерное распределение напряжения по ДУ обеспечивается керамическими конденсаторами *6*. Для устранения коронирования ДУ закрыты экранами *5*. Цилиндры *3* и *4* приводятся в движение изоляционной штангой *8* через рычажный механизм *7*. Включение и отключение выключателя производится пневматическим приводом. Выключатель заполнен элегазом при давлении 0,55 МПа. Неподвижные контакты выключателя *1* выведены из бака через проходной герметизированный изолятор *9* и *10* элегаз— элегаз, что означает переход из полости выключателя,

наполненной элегазом, в полость комплектного распреде лительного устройства, также заполненную элегазом (КРУЭ). Здесь *9* — изоляционная перегородка, *10* — разъ емный контакт розеточного типа. Такой изолятор позволя ет сохранить в выключателе элегаз при отсоединении ег от КРУЭ.

Описанный элегазовый выключатель имеет высокие тех нические показатели и допускает 20-кратное отключени тока КЗ предельного значения 40 кА без ревизий. Утечк элегаза из бака не превышает 1 % в год. Срок службы вы ключателя до капитального ремонта составляет 10 лет Разработаны ДУ с номинальным напряжением 220 кВ на один разрыв и током отключения 40 кА при высокой ско рости восстановления напряжения. Опытные образцы эле газовых выключателей допускают ток отключения до 100 кА при напряжении на разрыве 245 кВ и ток 40 кА при напряжении на разрыве до 362 кВ. Элегазовые выключате ли наиболее перспективны для напряжений выше 35 кВ и могут быть созданы на напряжение 800 кВ и выше.

18.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

В отличие от масляных и воздушных выключателей электромагнитные выключатели для своей работы не требуют масла или сжатого воздуха, более просты и удобны в эксплуатации, обладают высокой надежностью и большим сроком службы.

Электромагнитный выключатель серии ВЭ на напряжение 6 и 10 кВ, номинальный ток до 3,6 кА и номинальный ток отключения до 31,5 кА показан на рис. 18.25, *а*. Три полюса выключателя смонтированы на выкатной тележке *1*. При перемещении тележки влево пальцевый контакт *2* соединяется с медной шиной комплектного распределительного устройства (КРУ). Подвижный контакт *3* выключателя имеет вращательное движение относительно точки *О* и приводится в действие изоляционной штангой *4*, соединенной с механизмом выключателя. Разрывной контакт полюса имеет главные пальцевые контакты *5* и дугогасительные *6*, расположенные над главными контактами. ДУ выключателя *7* расположено над контактной системой. Для улучшения гашения малых токов выключатель имеет устройство воздушного дутья *8*, которое приводится в действие тягой *9*, соединенной с механизмом привода выключателя. При отключении выключателя в дутьевом устройстве создается сжатый воздух, который протекает по трубке *10* и воздействует на дугу, перемещая ее вверх и включая катушки магнитного дутья.

Присоединение цепей привода и сигнализации к схеме управления

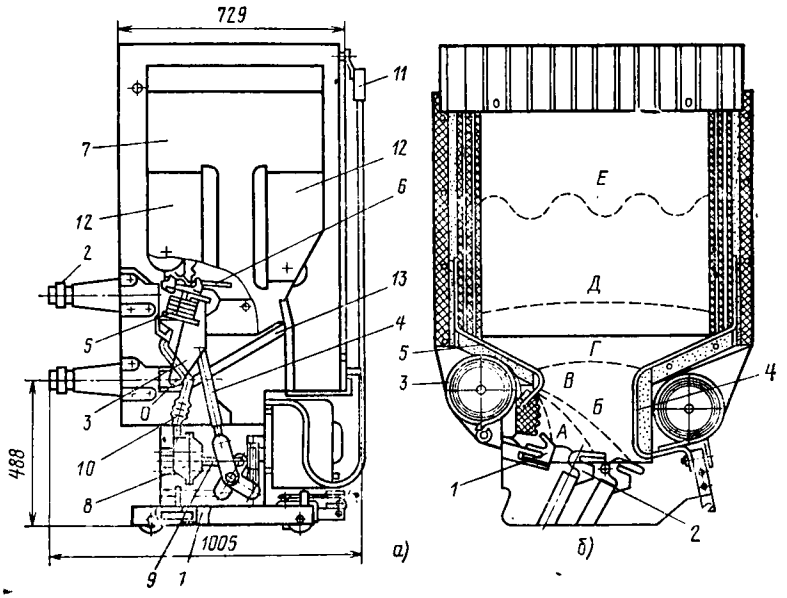


Рис. 18.25. Электромагнитный выключатель:

а — общий вид выключателя ВЭ-10; *б* — дугогасительное устройство

КРУ производится с помощью штепсельного контактного разъема *11*.

Правая катушка магнитного дутья *12* соединяется с нижним выводом выключателя шиной *13*.

ДУ выключателя изображено на рис. 18.25, *б*. При размыкании дугогасительных контактов *1* и *2* возникает дуга *А*, которая под действием электродинамических сил и конвекционных потоков воздуха перемещается в положение *Б*. Этому также способствует воздушное дутьевое устройство. Один конец дутьевой катушки *3* соединен с неподвижным контактом *1*, второй — с левым рогом *5*. При перемещении дуги вверх она касается рога *5*, при этом участок дуги между контактом 1 и нижним концом рога *5* шунтируется дутьевой катушкой. Так как полное сопротивление катушки мало, то этот участок дуги гаснет и катушка *1* включается в коммутируемую цепь последовательно. Магнитный поток, создаваемый катушкой *3*, проходит по полюсным наконечникам (поз. *12*, рис. 18.25, *а*), с помощью которых магнитное поле направляется перпендикулярно плоскости (рис. 18.25, *б*). Силы взаимодействия тока дуги и поля перемещают дугу вверх и затягивают ее в ДУ, состоящее из пакета керамических пластин с вырезами (рис. 4.24). При перемещении дуги в положение *Г* правый конец дуги переходит на дугогаситель-

ный рог *4* и включается вторая система магнитного дутья. В результа
те дуга движется с большой скоростью (около 100 м/с). По мере пере
мещения вверх дуга деформируется, принимая зигзагообразную форму
E (в горизонтальной плоскости), удлиняется и тесно соприкасается
с пластинами ДУ. Это приводит к росту сопротивления дуги и напря
жения на ней. Из-за эффективного отвода тепла от дуги градиент на
пряжения на ней, В/м, не зависит от тока [18.2] и равен

$$E = 190/\sqrt{\delta},$$

где δ — расстояние между пластинами, м.

Напряжение на дуге

$$U_д = El_д = 190l_д/\sqrt{\delta},$$

где $l_д$ — длина дуги, м.

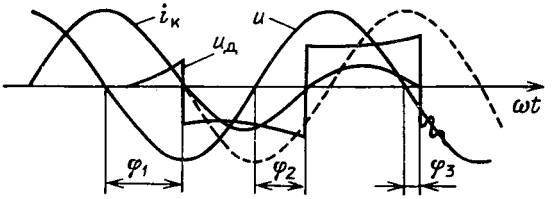


Рис. 18.26. Изменение угла между током и напряжением в ДУ электромагнитного выключателя

В результате сопротивление дуги становится больше сопротивления $X_к$ коммутируемой цепи, ток в цепи и сдвиг фаз между током и напряжением цепи уменьшаются, что приводит к облегчению восстановления напряжения на контактном промежутке.

Условие гашения дуги

$$U_д = El_д \geqslant E_m \sin \varphi_{пред}, \qquad (18.1)$$

где E_m — амплитуда ЭДС источника, В; $\varphi_{пред}$ — предельный угол сдвига фаз, при котором напряжение на дуге больше или равно возвращающемуся напряжению промышленной частоты, $\varphi_{пред}=32{,}5°$ [18.8].

Значения $l_д$ и δ выбираются так, чтобы соблюдалось неравенство (18.1). При $\varphi_{пред}=32{,}5°$ амплитуда тока в цепи уменьшается до 0,463 I_m.

Осциллограмма процесса отключения электромагнитного выключателя представлена на рис. 18.26. Здесь u — напряжение источника питания; $i_к$ — ток КЗ; φ_1, φ_2, φ_3 — углы сдвига фаз при КЗ. До момента размыкания контактов $\varphi_к=90°$. При первом прохождении через нуль напряжение на дуге $u_д$ мало и дуга загорается вновь. По мере удлине-

ия и охлаждения дуги напряжение на ней увеличивается. К моменту ретьего прохождения тока через нуль напряжение $u_д$ значительно ольше возвращающегося напряжения промышленной частоты, при том обеспечивается неравенство (18.1). Из-за значительного сопротивления дуги ток $i_к$ к моменту гашения дуги значительно уменьшается.

Описанный выключатель обеспечивает 10^4 коммутационных циклов ри $I_{ном}=1600$ А и $5\cdot10^3$ циклов при $I_{ном}=3600$ А без ревизии и ремонта. Механическая износостойкость его составляет $5\cdot10^4$ циклов. Поэтому выключатели этой серии применяются при большой частоте опеаций.

Выключатель имеет пружинный привод, который заводится двигателем. Привод обеспечивает однократный цикл 0—0,3—ВО с бестоковой паузой 0,3 с. Второй цикл может быть совершен через 15 с после завода включающих пружин.

Недостатком электромагнитных выключателей является большая проводимость стенок ДУ. Узкие щели ДУ нагреваются дугой до очень высоких температур, при которых начинают проводить ток. Большой остаточный ток (§ 4.4) может приводить к пробою по раскаленной поверхности пластин. Из-за этого номинальное напряжение электромагнитных выключателей не превышает 10 кВ.

18.8. ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

В вакуумных выключателях контакты расходятся в среде с давлением 10^{-4} Па. При таком вакууме дугогасительный промежуток имеет очень высокую электрическую прочность — примерно 100 кВ/мм. Малая плотность воздуха создает возможность гашения дуги без ДУ за время 0,01—0,02 с. Все это дает возможность создать выключатели с малым износом контактов, работающие при минимальном техническом обслуживании в течение нескольких десятков лет. Это определяет перспективность развития и широкого применения вакуумных выключателей. Процесс гашения дуги в вакууме рассмотрен в § 4.11. Здесь добавим, что образующиеся под действием высокой температуры ионы движутся к электродам, создавая вблизи них соответствующие объемные заряды (§ 4.1). Поток электронов направляется к аноду и производит его бомбардировку. Освобождающиеся из анода положительные ионы движутся к катоду и разрушают его. Эти процессы определяют срок службы контактов.

Следует отметить, что высокие значения напряженности электрического поля (при малых расстояниях между контактами) являются также причиной возникновения дуги в вакууме благодаря автоэлектронной эмиссии.

Малая плотность среды обусловливает очень высоку скорость диффузии зарядов из-за большой разницы пло ностей частиц в разряде и вакууме. Быстрая диффузия ча стиц, высокая электрическая прочность вакуума позволяю эффективно гасить дугу в вакуумном выключателе.

Для работы вакуумного выключателя имеет больше значение дегазация контактов, так как адсорбированны ими газы при разогреве выделяются и ухудшают вакуум С целью удаления газовых включений из контактов их на гревают в течение нескольких часов до красного каления

При работе выключателя распыленные материалы кон тактов осаждаются на поверхности изоляционного цилинд ра, что создает возможность перекрытия изоляции. Дл защиты цилиндра от паров металла электроды защищают ся специальными металлическими экранами *8*, *9* (рис 18.27). При отсутствии экранов электрон, разгоняясь в эле ктрическом поле по длинному пути, приобретает высоку энергию и при столкновении с молекулой может вызыват ее ионизацию. Благодаря экранам *8* и *9* электрическое по ле разбито на два небольших участка (между электрода ми *9* и *8* и между электродами *8* и *9*). Возможность пере крытия внутри камеры резко снижается.

При переменном токе после прохождения тока чере нуль происходит быстрое рассасывание зарядов вследстви диффузии, и через 10 мкс между контактами восстанавли вается электрическая прочность вакуума. Быстрое нараста ние электрической прочности промежутка после прохожде ния тока через нуль является большим достоинством вакуумных выключателей.

Для вакуумной дуги характерен обрыв (срез) тока при подходе к нулевому значению. При уменьшении тока пада ет давление паров металла, дуга становится неустойчивой и гаснет. Резкие уменьшения тока могут вызывать перена пряжения, опасные для отключаемого оборудования. Ток среза зависит как от параметров отключаемой цепи, так и от свойств материала контактов. Вольфрам обладает устойчивостью к свариванию, высокой температурой плавления и износостойкостью. Однако при вольфрамовых контактах значения тока среза и перенапряжений очень высоки, так как пары вольфрама создают низкое давление. Перенапряжения при медных контактах в 2,5 раза ниже, но они более подвержены свариванию и износу. Эти противоречия устраняются, если часть контактной поверхности выполнена из дугостойкого металла (молибден), а другая

часть — из материала с высоким давлением паров (сурьма). Хорошие результаты дает специальная металлокерамика. Наличие вакуума ухудшает охлаждение контактов. Однако за счет увеличения размеров подводящих шин, совершенствования конструкции ДУ и контактных материалов удается довести длительные токи до необходимых значений.

В вакуумной дугогасительной камере (рис. 18.27) контактный стержень *4* с контактным наконечником *1—2* жестко укреплен в металлическом фланце *6* керамического корпуса *10*. Контактный стержень подвижного контакта *5* связан с сильфоном *7*, выполненным из нержавеющей стали. Сильфон представляет собой цилиндрическую эластичную гармошку. Поэтому стержень *5* имеет возможность осевого перемещения. Внутренняя полость сильфона связана с атмосферой, поэтому контакт *3* верхнего контакта нажимает на контакт *3* нижнего контакта с силой, равной произведению площади сильфона S_c на атмосферное давление. Допустим, $S_c = 100$ см^2, тогда контактное нажатие равно 1000 Н, что достаточно для пропускания небольшого номинального тока. При больших номинальных токах и для получения необходимой динамической стойкости ставится дополнительная пружина, создающая необходимое нажатие контактов. Металлические экраны *8* и *9* служат для выравнивания электрического поля между контактами с целью повышения электрической прочности. Экран *8* защищает также керамику *10* от напыления паров металла, образующихся при гашении дуги. Контакты *1* и *2* имеют форму, показанную на рис. 18.28. Касание контактов *1* происходит в шести точках, что позволяет снизить переходное сопротивление и уменьшить температуру контактов. Следует отметить, что тепло, выделяемое в контактах *1*, *1′* и контактных стержнях *4*, *5*, отводится в основном тепло-

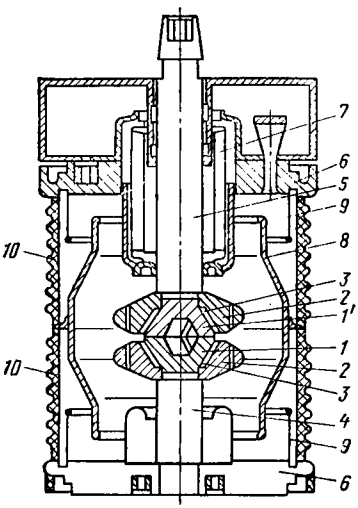


Рис. 18.27. Вакуумная дугогасительная камера

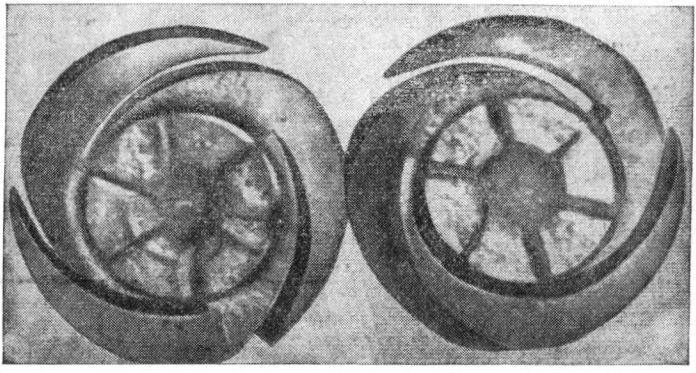


Рис. 18.28. Контакты ДУ

проводностью к нижнему фланцу *6* и шинам, соединяемым с контактом *5*. Из-за высокого вакуума отдача тепла в радиальном направлении идет только за счет излучения.

Поперечное магнитное поле в месте перехода тока из контакта *1* в контакт *1′* быстро перебрасывает дугу на криволинейные сегменты *2* (рис. 18.28). Перемещение дуги по контактам с большой скоростью позволяет уменьшить эрозию контактов и снизить количество паров металла в вакуумной дуге. При таких контактах удалось поднять номинальный ток отключения до 31,5 кА при напряжении 10 кВ. Однако при больших токах отключения напряжение на дуге начинает расти с увеличением тока (до 100 В и выше). При этом энергия дуги увеличивается, процесс гашения затрудняется. Как показали исследования, если мощная вакуумная дуга находится в продольном магнитном поле (индукция направлена по оси камеры), то удается снизить напряжение на дуге при больших токах (до 50 В) и отключать токи 100 кА при напряжении сети 10 кВ [18.9].

Параметры камеры КДВ-10-1600-20

Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальный ток отключения, кА	20
Длительный ток, кА, при дополнительном поджатии контактов 1600 Н	1,6
Средний ток среза, А, не более	10
Электрическая износостойкость, циклов ВО:	
при токе 1600 А	10^4
при токе 20 кА	25
Механическая износостойкость, циклов ВО	$2 \cdot 10^4$
Допустимый износ контактов, мм	4
Ход подвижного контакта, мм	12

Скорость подвижного контакта, м/с:

при включении	0,5—0,7
при отключении	2
Срок службы ДУ, лет	25

Общий вид выключателя, использующего ДУ по рис. 18.27, дан на рис. 18.29. Дугогасительные камеры *1*, залитые в эпоксидный компаунд, имеют выходные контакты *2* в виде розеток. ДУ укреплены на тележке *3*, в которой расположены механизм и привод выключателя.

Параметры вакуумных ДУ приведены в [3.1]. Высокая износостойкость вакуумных ДУ позволила создать вакуумные контакторы, примером которых может быть трехфазный контактор КВТ-6/10-400-4-У2 со следующими параметрами: номинальное напряжение 6 и 10 кВ; номинальный ток 400 А; номинальный ток отключения 4 кА; коммутационная износостойкость при номинальном токе 10^5 циклов ВО, при токе 4 кА—50 циклов ВО; механическая износостойкость 10^6 циклов ВО; частота включений в час 300.

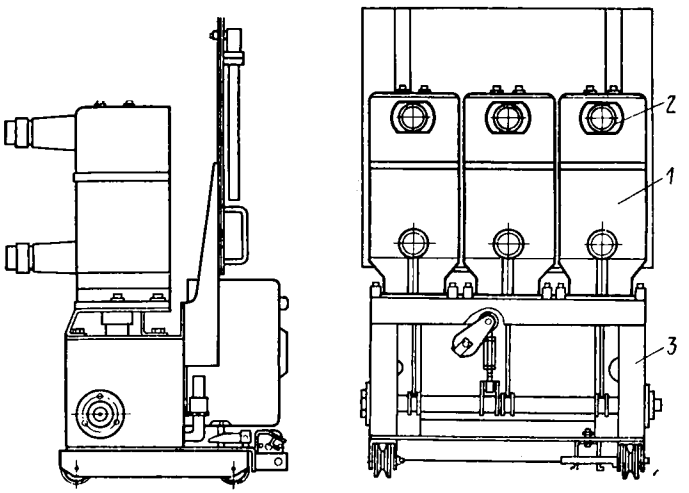


Рис. 18.29. Вакуумный выключатель

В настоящее время ведутся работы по увеличению номинального напряжения одного разрыва выключателя до 80 кВ при токе отключения 40 кА.

В заключение следует отметить следующие преимущества вакуумных выключателей перед другими типами:

1) отсутствие специальной дугогасящей среды, требую щей замены;

2) высокая износостойкость, обеспечивающая сро служ выключателей до 25 лет при минимальных эксплу атационных затратах;

3) быстрое восстановление электрической прочности междуконтактного промежутка;

4) полная взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие вы бросов продуктов горения дуги в окружающее простран ство;

5) высокое быстродействие, обусловленное малой мас сой контактов и их малым ходом;

6) широкий диапазон рабочих температур — от 70 до +200 °С.

К недостаткам можно отнести: возникновение больших перенапряжений при отключении индуктивной нагрузки что может приводить к повреждению изоляции; большие трудности при создании выключателей на номинальное напряжение 100 кВ и выше, когда приходится соединять несколько разрывов последовательно; сложность разработки и изготовления, большие затраты для организации производства. Тем не менее при массовом производстве себестоимость вакуумного выключателя приближается к себестоимости маломасляных и электромагнитных. При напряжении до 35 кВ вакуумный выключатель является наиболее перспективным, особенно при отключении больших токов высокой частоты.

При массовом производстве вакуумные выключатели всего на 5—15% дороже маломасляных и дешевле электромагнитных. Экономия эксплуатационных расходов обусловливает все более широкое распространение вакуумных выключателей (в Японии 50 % всех выключателей вакуумные).

18.9. СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Во всех рассмотренных выше выключателях расхождение контактов может начинаться при любом значении коммутируемого тока.

Энергия, выделяемая в дуговом промежутке выключателя любого типа, определяется уравнением

$$A_д = \int_0^{t_д} u_д i dt,$$

где $u_д$ — мгновенное значение напряжения на дуге; i — мгновенное значение тока в дуге; $t_д$ — время горения дуги.

Интеграл берется за каждый полупериод, после чего энергия суммируется.

Возрастание номинального тока отключения выключателей ведет к увеличению энергии $A_д$, выделяемой в дуговом промежутке. При этом усложняется конструкция выключателей, увеличиваются их габаритные размеры и масса. Кроме того, с ростом энергии $A_д$ увеличивается износ контактов. Даже применение металлокерамических контактов не решает этого вопроса при большом числе отключений.

Режим отключения можно значительно облегчить, если ограничить выделяемую в дуге энергию. Это достигается синхронизацией момента

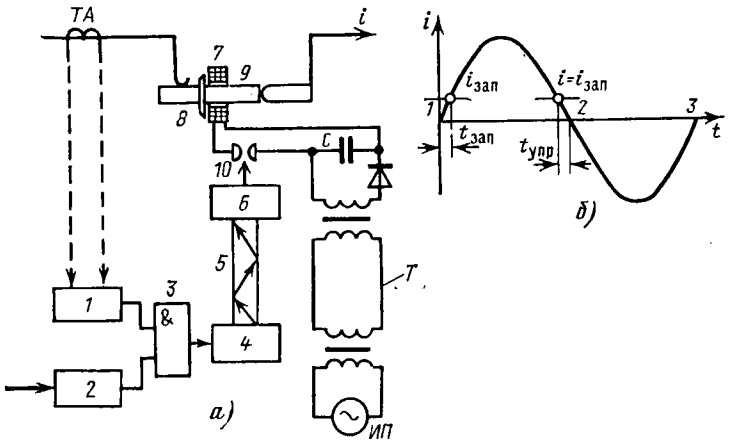


Рис. 18.30. Синхронизированное отключение цепей высокого напряжения:
а — структурная схема синхронизированного выключателя; *б* — к пояснению метода синхронизации

начала расхождения контактов с моментом прохождения тока через нуль при высокой скорости движения контактов. Структурная схема одного из вариантов синхронизированного выключателя представлена на рис. 18.30. Трансформатор тока ТА питает синхронизатор *1*, который выдает запускающий импульс 1,5—2 мс до момента прохождения тока через нуль. К этому моменту расстояние между контактами должно быть достаточным для надежного гашения дуги. При этом энергия, выделяемая при расхождении контактов, уменьшается в 10—50 раз. Уменьшается не только время горения дуги (до 1,5—2 мс), но и максимальное значение тока в дуге (до $0{,}2\,I_m$). Все это создает благоприятные условия для гашения дуги при первом прохождении тока через нуль.

На логический элемент *3* подаются сигналы от синхронизатора *1*

и релейной защиты *2*. Сигнал на выходе этого блока появляется при наличии сигнала от релейной защиты. От логического элемента *3* подается сигнал в систему оптической передачи *4—6*. Сигнал по волоконному световоду *5* поступает на фотоприемник *6*, в качестве которого используются фотодиоды либо фототиристоры. Сигнал приемника *6* используется для управления индукционно-динамическим приводом *7*, *8*, обеспечивающим необходимую скорость подвижного контакта *9* выключателя.

Принцип действия индукционно-динамического привода следующий. От источника питания *ИП* через трансформатор *Т* и диод заряжается конденсаторная батарея с емкостью $C=100\div300$ мкФ и напряжением батареи 3—5 кВ. При поджиге трехэлектродного разрядника *10* конденсатор разряжается на катушку *7*, расположенную вблизи диска *8*, изготовленного из материала с очень малым электрическим сопротивлением. Диск жестко связан с подвижным контактом *9*. Разряд батареи имеет колебательный характер с частотой 1—5 кГц. Под действием магнитного поля катушки, изменяющегося с такой частотой, в диске наводятся вихревые токи. Эти токи взаимодействуют с током катушки и создают силу, отталкивающую диск от катушки. Диск жестко связывается с подвижным контактом. Сила, действующая на диск,

$$P = -i_{\text{кат}}\, i_{\text{диск}} \frac{dM}{dx},$$

где M — взаимная индуктивность катушки и диска; x — перемещение диска.

Приведем некоторые приближенные расчеты. Пусть для надежного гашения дуги необходимо, чтобы подвижный контакт переместился на расстояние $h_{\text{к}}=30\div40$ мм за время $t=1{,}5\div2$ мс. Примем, что движение контакта равноускоренное и его масса составляет $m=3$ кг.

Тогда ускорение контакта

$$a = \frac{2h_{\text{конт}}}{t^2} = \frac{2\cdot0{,}04}{1{,}5^2\cdot10^{-6}} = 3{,}76\cdot10^4 \text{ м/с}^2.$$

Скорость контакта к концу хода

$$v = at = 3{,}76\cdot10^4\cdot1{,}5\cdot10^{-3} = 56{,}5 \text{ м/с}.$$

Сила, необходимая для его перемещения,

$$P = ma = 3\cdot3{,}76\cdot10^4 = 11{,}3\cdot10^4 \text{ Н}.$$

Описанный индукционно-динамический привод обладает очень высоким быстродействием.

Для повышения быстродействия диск привода связан с подвижным контактом без каких-либо промежуточных передач. Время передачи импульса от синхронизатора до трехэлектродного разрядника составля-

ет десятки микросекунд, так что полное время отключения выключателя не превышает 1,5—2 мс.

Схемы и методы синхронизации весьма разнообразны [18.3, 18.9]. Рассмотрим принцип синхронизации с запоминанием тока (метод МЭИ). Назовем время подачи синхронизирующего сигнала временем упреждения $t_{упр}$. После начала КЗ производится измерение значения тока и времени его наступления (рис. 18.30, *б*). В момент времени $t = t_{упр} = t_{зап}$ ток $i_{зап}$ запоминается. Затем текущее значение тока i сравнивается с током $i_{зап}$. В момент времени, когда $i = i_{зап}$, до нулевого значения тока останется время, равное $t_{упр}$. Если отсутствует апериодическая составляющая тока КЗ, то рассмотренный метод дает достаточную точность.

Полное время отключения синхронизированного выключателя вместе с защитой лежит в пределах 0,02 с.

По сравнению с другими типами синхронизированные выключатели имеют следующие преимущества:

1. Малая длительность горения дуги. Значительно уменьшаются износ контактов и эксплуатационные расходы.

2. Облегчается процесс гашения дуги. Уменьшение выделяемой дугой энергии позволяет увеличить номинальный ток отключения при том же расходе воздуха.

3. Увеличивается скорость восстановления электрической прочности промежутка. Работа выключателя при высоких скоростях восстановления напряжения допустима без шунтирующих резисторов.

4. Отключение КЗ за время $t < 0{,}02$ с повышает динамическую устойчивость энергосистем промышленной частоты.

Недостатком синхронизированных выключателей является сложность схемы и конструкции, наличие большого количества элементов, что сказывается на надежности работы. В связи с этим развитие синхронизированных выключателей на высокие напряжения временно затормозилось. Тем не менее принцип синхронного размыкания цепи используется во взрывных предохранителях с напряжением 6—10 кВ. Синхронизирующий сигнал приводит в действие взрывное устройство, разрушающее плавкую вставку, расположенную в трансформаторном масле. Благодаря высокому давлению (10—15 МПа) гашение дуги происходит при первом прохождении тока через нуль. Отключаемые токи могут достигать 200 кА при напряжении 10 кВ. Синхронизированное размыкание контактов используется и в полупроводниковых отключающих аппаратах.

18.10. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ

Стоимость выключателей с приводами довольно велика. С учетом необходимых для управления выключателем трансформаторов тока и устройств релейной защиты стоимость современного распределительного устройства получается очень высокой.

Если длительный ток установки невелик (400—600 А при напряжении 10 кВ), вместо выключателя с релейной защитой целесообразно использовать выключатель нагрузки и предохранители.

Выключатель нагрузки имеет ДУ небольшой мощности для отключения номинальных токов. В случае КЗ используется высоковольтный предохранитель. В выключателях нагрузки для гашения дуги применяются камеры с автогазовым, электромагнитным, элегазовым дутьем и вакуумными элементами.

В камерах с автогазовым дутьем гашение дуги осуществляется газами, которые выделяются под действием высокой температуры дуги стенками из газогенерирующего материала (органического стекла, винипласта и др.). Общий вид автогазового выключателя нагрузки типа ВН-16 на номинальное напряжение 10 кВ и отключаемый ток 200 А показан на рис. 18.31. Все три полюса размещаются на сварной раме. На нижнем опорном изоляторе полюса расположены вывод полюса и шарнир подвижного контакта *1*. На верхнем изоляторе укреплены неподвижный главный контакт *2*, дугогасительная камера *5* и второй вывод полюса. Подвижный главный контакт *1* выполнен из двух стальных пластин. В середине укреплен дугогасительный контакт *4* в виде изогнутой тонкой медной шины. Подвижные контакты приводятся в движение валом выключателя *3*, который соединен с контактами фарфоровой тягой. Отключение выключателя происходит под действием пружин *6*, которые заводятся при включении. В дугогасительной камере (рис. 18.31, *б*) расположен неподвижный дугогасительный контакт точечного типа *7*, соединенный с главным неподвижным контактом *2*. Корпус камеры выполнен из пластмассы и состоит из двух половин, стянутых винтами. Внутри корпуса размещены два вкладыша *8* из газогенерирующего материала — органического стекла.

Управление выключателем осуществляется ручным рычажным приводом со встроенным электромагнитом для дистанционного отключения. Если необходимо дистанционное включение, то может быть использован дополнительный электромагнитный привод.

Во включенном положении выключателя ток проходит через контур главных и дугогасительных контактов. Во время отключения сначала размыкаются главные контакты и весь ток перебрасывается в цепь дугогасительных контактов. После расхождения дугогасительных контактов между вкладышами *8* загорается дуга. Малая толщина подвижного дугогасительного контакта *4* и узкая щель, в которой он пе-

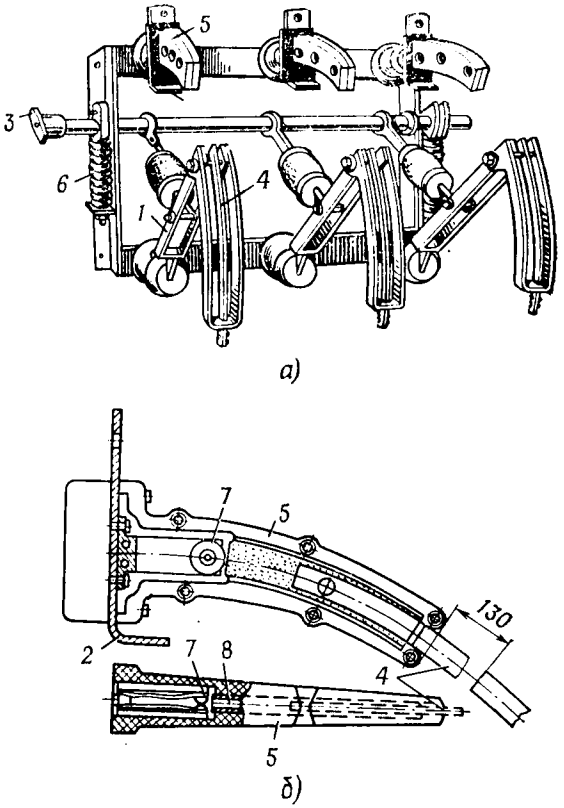


Рис. 18.31. Выключатель нагрузки типа ВН-16

ремещается, обеспечивают хороший контакт дуги со стенками вкладышей. Благодаря высокой температуре дуги вкладыши интенсивно выделяют газ, который стремится выйти из камеры через зазор между подвижным контактом и вкладышами. При этом возникает продольный обдув дуги, в результате чего она гаснет. Зона выброса газов из камеры 200—500 мм. Контакт *4* выходит из камеры тогда, когда дуга погаснет. В отключенном положении дугогасительный контакт отходит от камеры на расстояние, обеспечивающее достаточную электрическую прочность для данного класса напряжения. Последовательно с выключателем нагрузки включаются мощные предохранители типа ПК, которые защищают установку от КЗ.

Выключатель может снабжаться дополнительным устройством, которое автоматически отключает его после срабатывания предохраните-

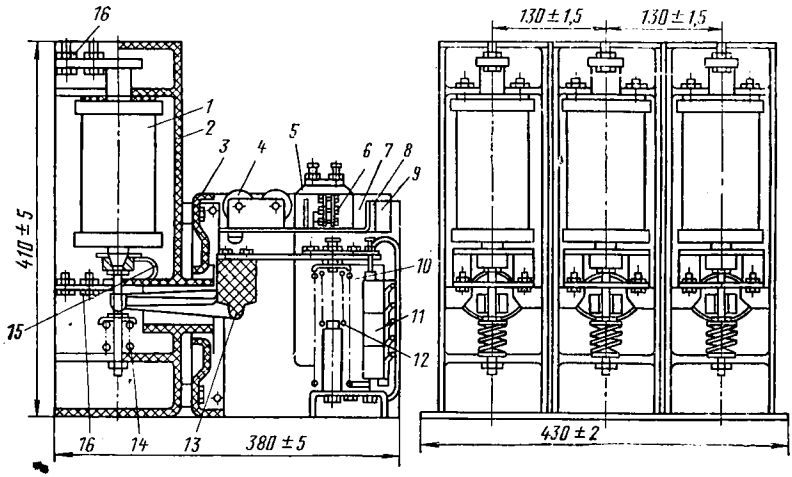


Рис. 18.32. Вакуумный контактор:

1 — камера вакуумная дугогасительная; *2* — каркас; *3* — основание; *4* — резистор; *5* — разъемы штепсельные; *6* — диод; *7* — щека; *8* — панель; *9* — счетчик числа циклов; *10* — привод электромагнитный; *11* — контакт вспомогательной цепи; *12* — пружины отключающие; *13* — траверса; *14* — пружина дополнительного поджатия; *15* — связь гибкая; *16* — выводы контактные

лей. Это устройство приводится в действие указателем срабатывания предохранителя.

Без замены вкладышей выключатель нагрузки допускает 75 отключений тока 200 А при напряжении 10 кВ.

Перспективны вакуумные выключатели нагрузки и контакторы. На рис. 18.32 представлен вакуумный контактор КВТ-6/10-400-4-У2 на камерах КВД-10-400-4-У2. Вакуумный контактор в отличие от выключателя нагрузки имеет большое допустимое число коммутаций номинального тока (10^5 ВО) и отключает 50 раз небольшие токи КЗ (4 кА при напряжении 10 кВ). Вакуумная камера *1* укреплена в изоляционном корпусе *2*. Дополнительное поджатие подвижного контакта создается пружиной *14*. Отключение производится изоляционной траверсой *13*, на которую действует электромагнит *10*. Электромагнит может питаться постоянным или переменным током через выпрямительный мост. Контактор КВТ-6/10-400-4-У2 имеет следующие данные: номинальное напряжение 6 и 10 кВ, номинальный ток 400 А, число допустимых коммутаций (ВО) при номинальном токе 10^5, число включений и отключений в час 300 при токе 400 А, номинальный ток отключения 4 кА, число допустимых коммутаций при этом токе 50.

На базе вакуумных ДУ могут быть созданы выключатели нагрузки на номинальный ток до 2 кА, номинальный ток отключения 6 кА и номинальное напряжение до 36 кВ [18.7].

18.11. ВЫБОР ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

При выборе выключателя его номинальные параметры сравниваются с параметрами сети в месте его установки. Выключатель выбирается по наиболее тяжелому режиму работы, который возможен в эксплуатации.

Номинальное напряжение выключателя $U_{ном,в}$ должно быть равно или больше номинального напряжения защищаемой сети $U_{ном,с}$.

Номинальный длительный ток выключателя $I_{ном,в}$ должен быть больше номинального тока установки $I_{ном,у}$.

Номинальный ток отключения выключателя $I_{о,ном}$ должен быть больше максимального расчетного тока короткого замыкания $I_к$ к моменту расхождения контактов.

При определении $I_к$ необходимо рассмотреть все возможные варианты КЗ и выбрать наиболее тяжелый вероятный режим. Как правило, наиболее тяжелые режимы создаются при отключении трех- и однофазного КЗ на землю. Расчет апериодической слагающей ведется из условия, что КЗ произошло в момент, когда напряжение в одной из фаз равно нулю. Ток $I_{вкл,ном}$ должен быть не менее ударного тока КЗ, протекающего через выключатель.

При выборе выключателя следует иметь в виду, что в момент размыкания контактов выключателя апериодическая составляющая тока КЗ не должна превышать апериодический ток, гарантированный заводом-изготовителем. Обычно этот ток выражается в процентах номинального тока отключения.

Расчетное время размыкания берется равным минимально возможному. Расчет токов КЗ описан в [1.3].

Наряду с номинальным током отключения необходимо учитывать циклы (последовательность включений и отключений — ВО), при которых выключатель работает. Номинальный ток отключения выключателей без АПВ гарантируется при цикле О—180—ВО—180—ВО. Для выключателей, работающих в циклах многократного быстродействующего АПВ, возможно уменьшение номинального тока отключения, особенно при втором или третьем АПВ.

Термическая стойкость проверяется из условия протека-

ния через выключатель тока КЗ в течение максимального времени, обусловленного срабатыванием защиты.

Номинальный ток электродинамической стойкости выключателя должен превышать максимально возможное значение ударного тока КЗ, которое может быть в установке. Обычно сравнивают мгновенные значения пика тока.

Выпускаемые промышленностью выключатели испытываются при скоростях восстановления напряжения, которые являются типовыми. Однако в некоторых случаях необходимо проводить расчет скорости восстановления напряжения в проектируемых сетях и сравнивать с условиями, которые имели место при испытаниях аппарата. Особенно тяжелые условия с этой точки зрения имеют место при КЗ на зажимах мощных генераторов, трансформаторов и неудаленных КЗ. Иногда требуется установка специальных шунтирующих резисторов для снижения скорости восстановления напряжения. Для мощных системных выключателей, от работы которых зависит устойчивость параллельно работающих сетей, важным параметром является время отключения и время повторного включения. Иногда эти параметры диктуют выбор типа выключателя и его привода.

При выборе типа выключателя следует учитывать следующие обстоятельства:

1. При номинальном напряжении 6—10 кВ и редких коммутациях целесообразно применение маломасляных выключателей. При частых коммутациях рекомендуется применять вакуумные и элегазовые, обладающие большим сроком службы.

2. При номинальном напряжении 35—110 кВ и номинальных токах отключения до 20 кА целесообразно применять маломасляные выключатели. При бóльших номинальных напряжениях и бóльших номинальных токах отключения применяются воздушные и элегазовые выключатели.

При экономической оценке выбираемого типа выключателей следует учесть, что, несмотря на то, что вакуумные выключатели имеют бóльшую стоимость, применение их более оправдано ввиду малых расходов на техническое обслуживание и большого срока службы ДУ (до 25 лет).

Глава девятнадцатая

РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Разъединители служат для включения и отключения цепи высокого напряжения либо при токах, значительно меньших номинальных, либо в случаях, когда отключается номинальный ток, но напряжение на контактах аппарата недостаточно для образования дуги.

В первом случае разъединители применяются, как правило, для отсоединения от напряжения высоковольтного оборудования перед ревизией или ремонтом (рис. 19.1, *а*).

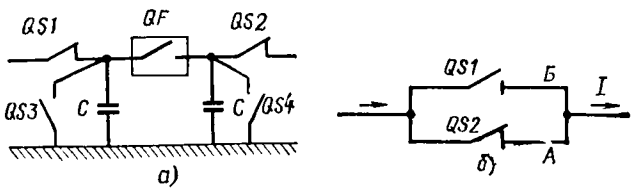


Рис. 19.1. Схемы включения разъединителей

Согласно правилам техники безопасности оборудование, выводимое в ремонт, должно быть отключено. Между выводами отключенного аппарата и цепью, оставшейся под напряжением, должен быть создан видимый воздушный промежуток, гарантирующий безопасные условия работы обслуживающего персонала.

Для безаварийной работы ток в цепи сначала отключается выключателем *QF*, и только потом размыкаются контакты разъединителей *QS1* и *QS2*. В этом случае разъединителями отключаются небольшие емкостные токи, создаваемые опорной изоляцией отключаемого аппарата и присоединенными к нему проводниками.

После размыкания *QS1* и *QS2* выключатель *QF*, подлежащий ремонту, должен быть заземлен с обеих сторон с помощью дополнительных разъединителей *QS3* и *QS4*. Если ножи *QS3* и *QS4* не заземлены, то на выводах выключателя *QF* может возникать высокий потенциал за счет емкостной связи с линиями высокого напряжения. Для удешевления и упрощения схем коммутации разъединители исполь-

зуются для отключения небольших токов (токов холостого хода трансформаторов, зарядных токов воздушных и кабельных линий). Допустимые нагрузки разъединителей приведены в [19.2].

В ряде случаев разъединителями можно пользоваться для перевода нагрузки с одной ветви *А* на другую *Б* (рис. 19.1, *б*). Для этого при замкнутом разъединителе *QS2* включают разъединитель *QS1*. После этого разъединитель *QS2* отключают. Дуга на его контактах не возникает, так как напряжение на них равно падению напряжения на ветви *QS1*, которое ничтожно мало.

К разъединителям предъявляются следующие требования:

1. Контактная система должна надежно пропускать номинальный ток сколь угодно длительное время. В особо тяжелых условиях работают разъединители наружных установок, подвергающиеся воздействию воды, пыли, льда. Контактная система должна иметь необходимую динамическую и термическую стойкость.

2. Разъединитель и механизм его привода должны надежно удерживаться во включенном положении при протекании тока КЗ. В отключенном положении подвижный контакт должен быть надежно фиксирован, так как самопроизвольное включение может привести к очень тяжелым авариям и человеческим жертвам.

3. В связи с особой ролью разъединителя как аппарата безопасности промежуток между разомкнутыми контактами должен иметь повышенную электрическую прочность.

4. Привод разъединителя целесообразно блокировать с выключателем. Операции с разъединителем должны быть возможны, только когда выключатель отключен.

19.2. КОНСТРУКЦИЯ РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ И ИХ ПРИВОДОВ

Для внутренних установок, не подверженных воздействию атмосферы и с напряжением, как правило, не выше 20 кВ, наиболее широко распространены рубящие разъединители с движением подвижного контакта (ножа) в вертикальной плоскости.

Для получения электродинамической стойкости контактов необходимо соответствующее контактное нажатие. С ростом тока контактное нажатие и усилие, необходимое для включения, возрастают. При ручных приводах контактные нажатия стремятся брать возможно малыми. С этой целью применяют сдвоенные ножи и электромагнитные замки.

Для повышения электродинамической стойкости контактов разъединителей широко используются электродинамические силы, возникающие в токоведущих элементах.

На рис. 19.2 показан трехполюсный разъединитель типа РВ на напряжение 10 кВ и ток 400 А, а на рис. 19.3 — в увеличенном масштабе его контактная система.

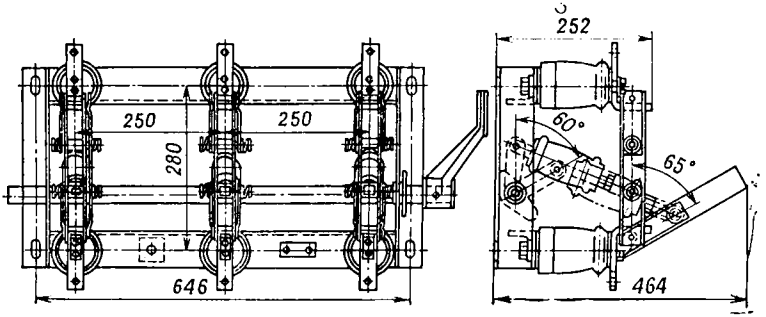


Рис. 19.2. Разъединитель типа РВ

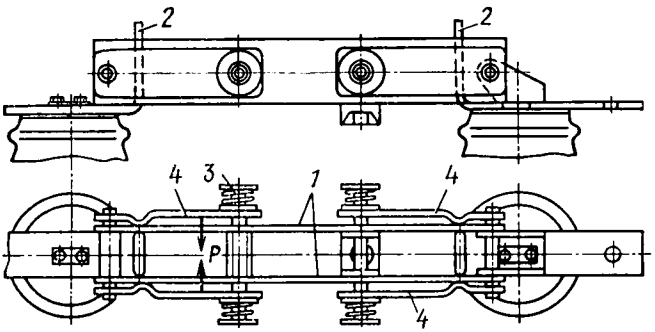


Рис. 19.3. Контактная система разъединителя типа РВ

Подвижный контакт *1* выполнен в виде двух параллельных шин. При КЗ электродинамическая сила прижимает шины *1* к стойкам неподвижного контакта *2*. При номинальном токе контактное нажатие создается пружинами *3*, которые воздействуют на подвижный контакт через стальные пластины *4*.

Магнитный поток, создаваемый проходящим по шинам током, замыкается вокруг них и через стальные пластины *4*. В системе возникают электродинамические силы такого направления, чтобы возросла

энергия магнитного поля. Пластины приближаются к шинам 1 и попадают в зону более сильного магнитного поля. Электромагнитная энергия при этом возрастает. Таким образом создается сила P, притягивающая стальные пластины к шинам и увеличивающая контактное нажатие.

Для управления разъединителями типа РВ применяются рычажные системы с ручным или моторным приводом. В схеме ручного рычажного привода (рис. 19.4) вал разъединителя имеет угол поворота 90°. Рычаг привода имеет угол поворота 150°. Чтобы избежать отключения под действием электродинамических сил, во включенном положении механизм находится в положении, близком к мертвому (шатун *1* и короткий рычаг *2* шарнира *О* располагаются почти на прямой). Кро-

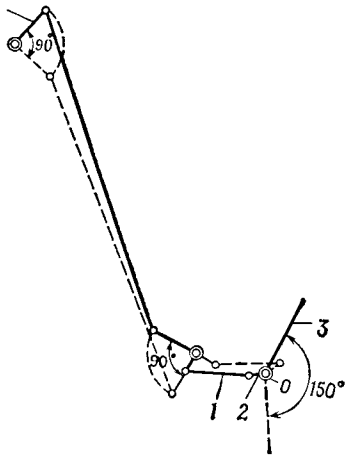


Рис. 19.4. Рычажный привод разъединителя

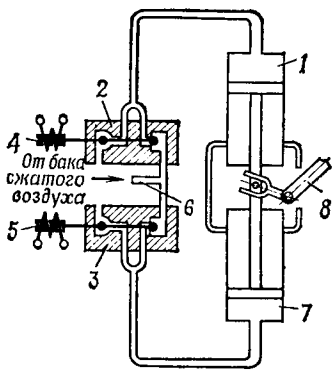


Рис. 19.5. Пневматический привод разъединителя

ме того, включающий рычаг *3* фиксируется в отключенном и включенном положениях с помощью специальных стопоров. При токах более 3 кА рычаг *3* заменяется червячной передачей, что позволяет увеличить действующую на шины силу.

Для дистанционного управления применяются электрические и пневматические приводы. В электрических приводах ось двигателя связывается с выходным рычагом привода через систему червячной передачи.

В пневматическом приводе отсутствуют громоздкие рычажные передачи и обеспечивается плавный ход контактов (рис. 19.5). Поршневой механизм (цилиндры, поршни) *1*, блок пневматических клапанов управления *2* и *3* и электромагниты управления *4* и *5* устанавливаются непосредственно на раме разъединителя. К разъединителю подводятся

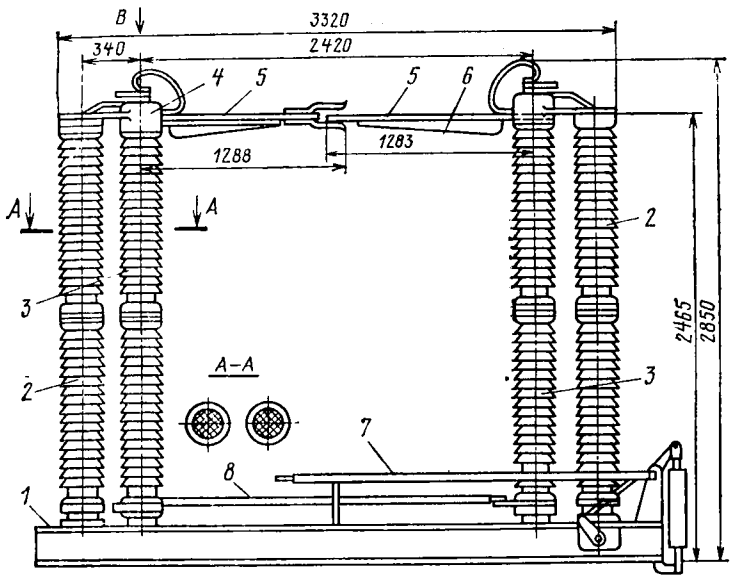


Рис. 19.6. Разъединитель типа РНДЗ-1

трубопровод со сжатым воздухом *6* и цепи управления электромагнитами.

Поршневой механизм проектируется так, что он находится в «мертвом» положении при включенном и отключенном разъединителе.

При подаче напряжения на обмотку электромагнита *4* срабатывает клапан включения *2*. Верхний цилиндр включения поршневого механизма *1* разобщается с атмосферой, и в него подается сжатый воздух под давлением 0,5—1 МПа. В это время нижний цилиндр *7* отключения через клапан отключения *3* связан с атмосферным воздухом и не препятствует движению нижнего поршня вниз. Под действием сжатого воздуха верхний поршень поворачивает рычаг и связанный с ним вал разъединителя *8*, что приводит к замыканию контактов. Аналогично протекает процесс отключения.

Для наружной установки широко используются разъединители поворотного типа РНД. На рис. 19.6 представлен разъединитель типа РНДЗ-1 на напряжение 220 кВ и номинальный ток 2 кА. На раме *1* смонтированы неподвижные изоляторы *2* и подвижные изоляторы *3*, которые могут вращаться вокруг своей вертикальной оси. С подвижным изолятором связаны контакты разъединителя в виде ножей *5*, вращающихся в горизонтальной плоскости. Места сочленения подвиж-

ных деталей защищены кожухом *4*. Для размыкания ножей *5* поворачивается правый изолятор *3*, который с помощью тяги *8* поворачивает левый изолятор *3*. При необходимости правый нож в положении «отключено» может быть заземлен с помощью дополнительного ножа *7*, который вращается в вертикальной плоскости и замыкается с контактом *6*. Благодаря механической блокировке заземление возможно только при отключенном положении ножей *5*. Разъединители такого типа применяются при напряжении до 750 кВ.

Следует отметить, что площадь открытого распредустройства (ОРУ) в значительной степени определяется площадью, занимаемой разъединителями. При напряжении $U_{ном}>330$ кВ значительную экономию площади дают подвесные разъединители (рис. 19.7). Неподвижный

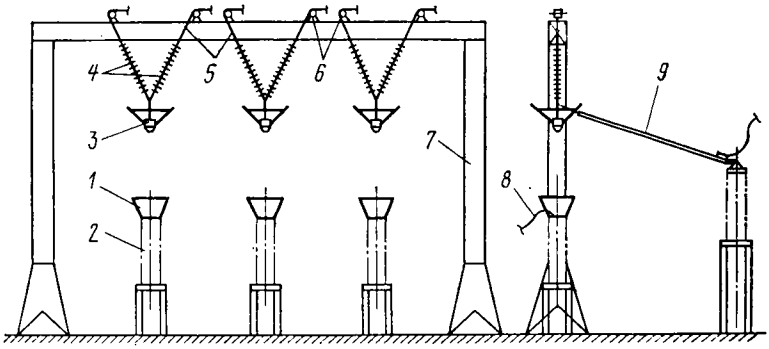


Рис. 19.7. Подвесной разъединитель

контакт *1* в виде кольца укреплен на изоляторе *2*. В качестве опоры контакта *1* могут использоваться трансформаторы тока или напряжения. Конический подвижный контакт *3* подвешен к гирлянде *4* подвесных изоляторов на стальных тросах *5*. Тросы *5* пропущены через блоки *6* на портале *7* и связаны с барабаном электролебедки. Подвижный контакт *3* соединен с токоведущей трубой *9*, неподвижный контакт соединен с гибкой шиной *8* либо с контактом аппарата. При включении контакт *3* опускается вниз под действием специального груза, который создает необходимое контактное нажатие. При отключении контакт *3* и связанный с ним груз поднимаются с помощью электролебедки. Такие разъединители разработаны в СССР на напряжение до 1150 кВ и длительные токи до 3,2 кА [19.4].

19.3. БЛОКИРОВКА РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ И ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Отключение разъединителя при прохождении через него номинального тока ведет к тяжелой аварии, иногда с поражением людей. Образующаяся дуга очень подвижна, быстро удлиняется, что ведет к перемыканию полюсов и возникновению КЗ. Во избежание таких последствий разъединители блокируются с выключателями с помощью механических, механических замковых и электромагнитных замковых блокировок.

В первом случае рычаг привода разъединителя оказывается свободным только при отключенном положении механизма выключателя. При такой блокировке очень трудно связать механизм выключателя со многими приводами разъединителей. В каждом отдельном случае приходится конструировать свой блокирующий механизм применительно к конструкции распредустройства. В силу этого подобная блокировка применяется редко.

При механической замковой блокировке на выключателе и связанном с ним разъединителе установлены специальные замки, которые могут быть открыты только специальным ключом. Ключ находится в замке, установленном на выключателе. Его можно вынуть из замка только при отключенном состоянии выключателя, т. е. при отсутствии тока через разъединитель. После этого ключ вставляют в замок на приводе разъединителя и освобождают его механизм. Разъединитель может включаться и выключаться только в том случае, когда ключ находится в его замке. Операции с другими разъединителями при этом невозможны. Таким образом, здесь отсутствует механическая связь приводов выключателя и разъединителей.

Более совершенна электромагнитная замковая блокировка (рис. 19.8). Для операции с разъединителем ключ в виде электромагнита (рис. 19.8, *а*) должен быть вставлен в замок (рис. 19.8, *б*). Концы катушки *2* электромагнита выведены на штыревые контакты *3*. Если выключатель, связанный с данным разъединителем, отключен, то через его размыкающие блок-контакты и гнезда *4* подается напряжение на катушку *2*. При нажатии на кольцо *1* якорь *5* опускается и под действием электромагнитной силы сцепляется с запирающим

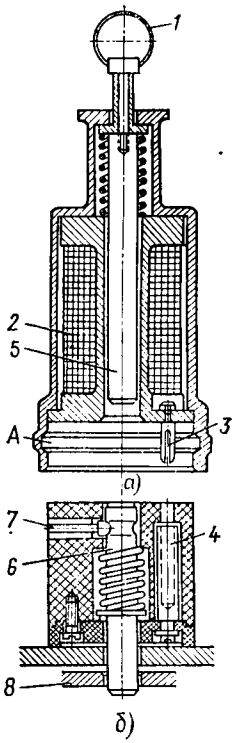


Рис. 19.8. Электромагнитная блокировка с ключом

плунжером *6*. Теперь при движении якоря *5* вверх он будет перемещать связанный с ним плунжер *6*. В результате деталь *8* привода разъединителя будет освобождена, а штифты *7* войдут в паз *А* ключа, не допуская его снятия с замка. Для блокировки всех разъединителей достаточно одного ключа на все распределительное устройство.

19.4. ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

а) **Назначение и принцип действия.** В настоящее время начинают широко применяться высоковольтные подстанции без выключателей на питающей линии. Это позволяет удешевить и упростить оборудование при сохранении высокой надежности. Для замены выключателей на стороне высокого напряжения используются короткозамыкатели и отделители.

Короткозамыкатель — это быстродействующий контактный аппарат, с помощью которого по сигналу релейной защиты создается искусственное КЗ сети.

Отделитель представляет собой разъединитель, который быстро отключает обесточенную цепь после подачи команды на его привод. Если в обычном разъединителе скорость отключения мала, то в отделителе процесс отключения длится 0,5—1 с.

В качестве примера применения короткозамыкателей и отделителей на рис. 19.9 приведена схема питания от одной линии двух трансформаторных групп *Т1* и *Т2*. В схему кроме быстродействующих короткозамыкателей *QK1* и *QK2*, введены отделители *Q1* и *Q2*, которые при нормальном режиме работы замкнуты. Допустим, вследствие ухудшения изоляции трансформатора *Т1* внутри него возникают электрические разряды, которые приводят к разложению масла и выделению газа. Газовые пузырьки, поднимаясь вверх, приводят к срабатыванию газового реле. По сигналу этого реле включается короткозамыкатель и в цепи возникает искусственное КЗ. Под действием тока КЗ срабатывает выключатель защиты *QF1*

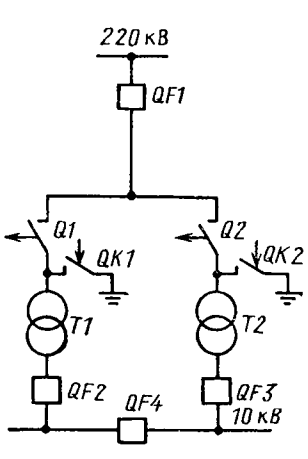


Рис. 19.9. Схема коммутации с отделителями и короткозамыкателями

и обе группы *T1* и *T2* обесточиваются. С помощью релейной защиты трансформатора *T1* отключается также выключатель *QF2*, после чего с некоторой выдержкой отключается отделитель *Q1*. Затем, так как режим искусственного КЗ оказался отключенным, снова включается выключатель *QF1*. Если до аварии выключатель *QF4* был отключен, то после включения выключателя *QF1* он может быть включен. При этом будет восстановлено питание потребителей на шинах 10 кВ первой трансформаторной группы.

Таким образом, в этой схеме удается не ставить выключатели на стороне 220 кВ трансформаторов *T1* и *T2*. Однако для надежной работы необходима четкая последовательность в работе короткозамыкателей, выключателей и отделителей. Иначе возможны такие тяжелые аварийные случаи, как отключение тока КЗ отделителями и др.

Эффективность такой схемы тем выше, чем больше номинальное напряжение сети. Указанный эффект достигается за счет отсутствия выключателей на стороне 35—220 кВ, а также аккумуляторных батарей и компрессорных установок. Уменьшается площадь подстанции. Создается возможность приближения напряжения 35—220 кВ непосредственно к потребителям. Сокращаются сроки строительства.

По данным [19.3], применение отделителей и короткозамыкателей позволяет удешевить стоимость подстанции на 40—50 % и практически сохранить ту же надежность.

б) **Конструкция короткозамыкателей и отделителей.** На рис. 19.10 представлен короткозамыкатель КЗ-110 на напряжение 110 кВ. На стальной коробке *1* установлен опорный изолятор *2*. Вверху опорного изолятора расположен неподвижный контакт *3*, находящийся под высоким напряжением. Подвижный заземленный контакт — нож *4* укреплен на валу *5* привода короткозамыкателя. Для создания необходимой прочности нож *4* имеет ребро жесткости *6*. Основание *1* изолировано от земли и присоединяется к одному концу первичной обмотки трансформатора тока, второй конец которой заземлен (рис. 19.12). На вал *5* действует пружина привода, которая заводится в отключенном состоянии. Для включения подается команда на электромагнит привода, который освобождает защелку механизма. Под действием пружины нож перемещается в вертикальной плоскости вверх и заземляет контакт *3*. Время включения такого короткозамыкателя 0,15—0,25 с.

В основу конструкции отделителя ОД-110У на 110 кВ (рис. 19.11) положен двухколонковый разъединитель с вращением ножей *1* в горизонтальной плоскости. Приведение в движение колонок *2* осуществляется пружинным приводом *3* с электромагнитным управлением. Во вклю-

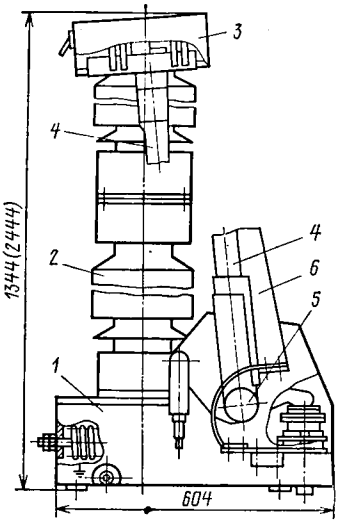


Рис. 19.10. Короткозамыкатель

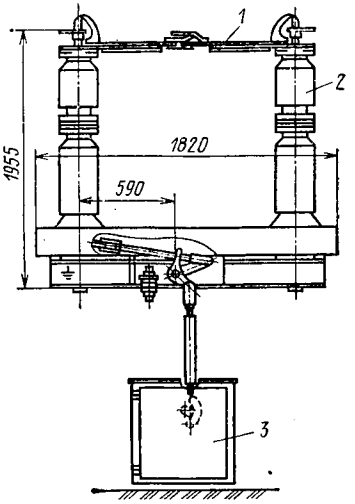


Рис. 19.11. Отделитель

ченном положении пружины привода заведены. При подаче команды пружина освобождается и контакты расходятся за время 0,4—0,5 с.

Параметры отечественных короткозамыкателей и отделителей приведены в [3.1].

Схема релейной защиты при использовании отделителей и короткозамыкателей приведена на рис. 19.12. Короткозамыкатель *1* имеет пружинный привод *4*. Механизм расцепления *6* привода может срабатывать от реле максимального тока мгновенного действия *8* и независимого расцепителя *10*. От трансформатора тока *3* питается электромагнит *9* расцепителя отделителя *2*. Отделитель отключается под действием пружины *5*. При нормальной работе подстанции отделитель *2* включен, а короткозамыкатель *1* выключен. При внутреннем повреждении трансформатора срабатывает либо реле дифференциальной защиты КА, либо газовое реле $B_г$. Промежуточное реле при этом включает электромагнит независимого расцепителя *10*. В результате короткозамыкатель *1* включается и через трансформатор тока *3* течет ток КЗ. Электромагнит *9* включается, и его якорь *11* заводит пружину *12*. Схема будет находиться в таком состоянии до тех пор, пока от своей защиты не отключится выключатель, установленный на стороне высокого напряжения 220 кВ (выключатель *QF1* на схеме рис. 19.9). После отключения этого выключателя ток через короткозамыкатель *1* и в обмотке трансформатора *3* прекратится. Электромагнит *9* обесточится, его якорь

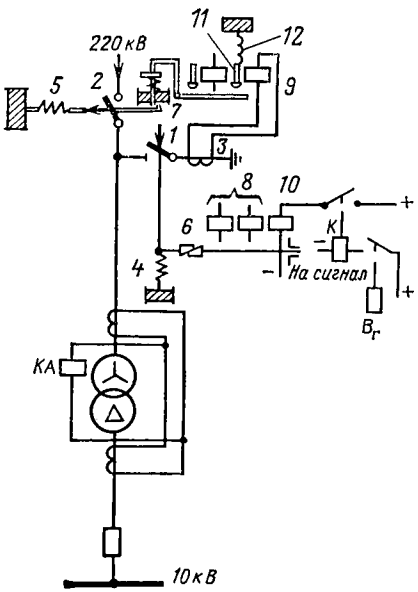


Рис. 19.12. Схема релейной защиты при использовании отделителей и короткозамыкателей

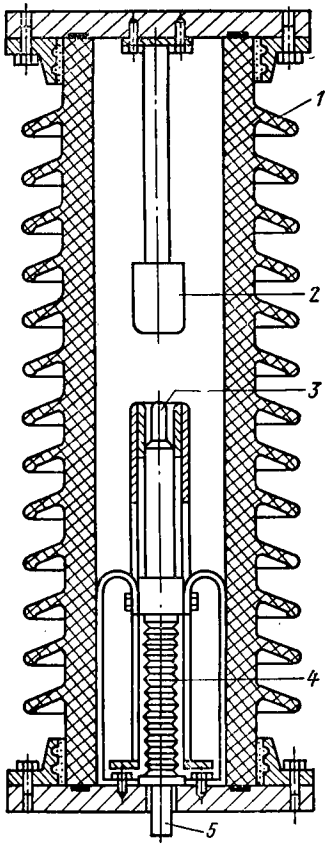


Рис. 19.13. Элегазовый короткозамыкатель $U_{ном}$=110 кВ

под действием возвратной пружины освобождает защелку 7, и отделитель 2 размыкается. Теперь выключатель на питающем конце линии может включаться вновь. Такая схема применяется только тогда, когда выключатель срабатывает (отключается) от замедленно действующей защиты. При быстродействующей защите линии применяются другие схемы.

Описанные выше конструкции короткозамыкателей и отделителей имеют большое время срабатывания (0,5—1 с), что удовлетворяет современные требования к энергосистемам. В перспективе это время должно быть уменьшено до 0,08—0,12 с при напряжениях до 220 кВ. Рассмотренные аппараты не обеспечивают также достаточную надежность работы при гололеде и сильных морозах. Для уменьшения вре-

мени включения замыкателя и времени отключения отделителя необходимо сокращать междуконтактное изоляционное расстояние путем применения элегазовой или вакуумной среды. Более перспективным является использование элегазовых аппаратов, так как удается получить необходимую прочность при одном разрыве. Для вакуумных аппаратов необходимо включение нескольких разрывов последовательно.

На рис. 19.13 представлен элегазовый короткозамыкатель на напряжение 110 кВ. В фарфоровом цилиндре *1* установлены контакты *2* и *3*. Давление элегаза в цилиндре составляет 0,3 МПа. Привод подвижного контакта *3* осуществляется тягой *5*. Стальной сильфон *4* обеспечивает герметизацию полости цилиндра *1*. Расстояние между контактами 85—110 мм. Время срабатывания в 4—5 раз меньше, чем у существующих короткозамыкателей открытого типа. Короткозамыкатель защищен от климатических воздействий окружающей среды.

в) Выбор разъединителей. Номинальное напряжение разъединителя должно соответствовать номинальному напряжению высоковольтной сети.

Наибольший длительный ток нагрузки потребителя не должен превышать номинальное значение длительного тока разъединителя.

Ударный ток КЗ в месте установки разъединителя не должен превышать допустимую амплитуду ударного тока КЗ разъединителя.

Ток термической стойкости $I_т$ в течение времени $t_т$, гарантированный заводом-изготовителем, и ток КЗ $I_к$, протекающий через разъединитель в течение времени $t_к$, должны быть связаны соотношением

$$I_т^2 t_т \geqslant I_к^2 t_к.$$

Внешние условия работы разъединителя должны соответствовать реальным условиям эксплуатации аппарата (скорость ветра, температура, гололед).

г) Выбор короткозамыкателей и отделителей. Номинальное напряжение короткозамыкателя должно соответствовать номинальному значению напряжения сети.

Динамическая и термическая стойкости короткозамыкателя должны соответствовать току КЗ в месте его установки.

Время включения короткозамыкателя должно соответствовать требованиям схемы автоматики.

Номинальные данные по току и напряжению отделителя выбираются так же, как и для разъединителя. Кроме того, время отключения должно соответствовать требованиям схемы автоматики.

Глава двадцатая

РЕАКТОРЫ

20.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Реактор — это электрический аппарат в виде катушки с неизменной индуктивностью для ограничения токов КЗ и поддержания напряжения на шинах при аварийном режиме. Для пояснения рассмотрим схему рис. 20.1. Генератор G питает сборные шины *1*, от которых отходят линии *2* к потребителю. Возьмем два случая: в первом за выключателем *QF1* отсутствует реактор, во втором за выключателем *QF2* установлен реактор L.

При трехфазном КЗ $I_{к1}$ определяется в основном индуктивным сопротивлением генератора

$$I_{к1} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\,X_г}. \qquad (20.1)$$

Введем понятие *относительного индуктивного сопротивления генератора* в процентах

$$x_г\% = \frac{I_{ном,г}\,X_г\sqrt{3}}{U_{ном}}\,100, \qquad (20.2)$$

где $I_{ном,г}$ — номинальный ток генератора. Из (20.1) и (20.2) следует

$$I_{к1} = I_{ном,г}\,\frac{100}{x_г\%}. \qquad (20.3)$$

В этом случае при КЗ напряжение на сборных шинах будет равно нулю и на всех отходящих линиях пропадет напряжение. Формула (20.3) очень удобна для определения тока КЗ в случае, когда его значение определяется сопротивлением одного элемента схемы. Берется номинальный ток элемента установки $I_{ном}$, множится на 100 и делится на реактивное сопротивление данного элемента в процентах.

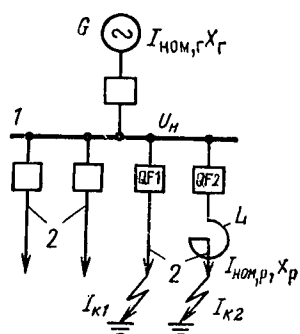


Рис. 20.1. К принципу действия реактора

Необходимо отметить, что выключатель *QF1* должен быть выбран по току КЗ $I_{к1}$. Ток КЗ в линии с реактором определяется

суммарным сопротивлением генератора и реактора:

$$I_{к2} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\,(X_г + X_р)}. \qquad (20.4)$$

Определим в этом случае относительное индуктивное сопротивление реактора в процентах

$$x_{р\%} = \frac{I_{ном,р} X_р \sqrt{3}}{U_{ном}} 100. \qquad (20.5)$$

Обычно один генератор обслуживает несколько десятков потребителей. Поэтому номинальный ток линии во много раз меньше номинального тока генератора. Длительный ток реактора выбирается равным току линии. Таким образом, $I_{ном,р} \ll I_{ном,г}$.

Положим, что $x_{г\%} = x_{р\%}$. Тогда из (20.1) и (20.5) следует, что $X_р \gg X_г$. При этом можно написать, что

$$I_{к2} \approx \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} X_р} = I_{ном,р} \frac{100}{x_{р\%}} \ll I_{к1}.$$

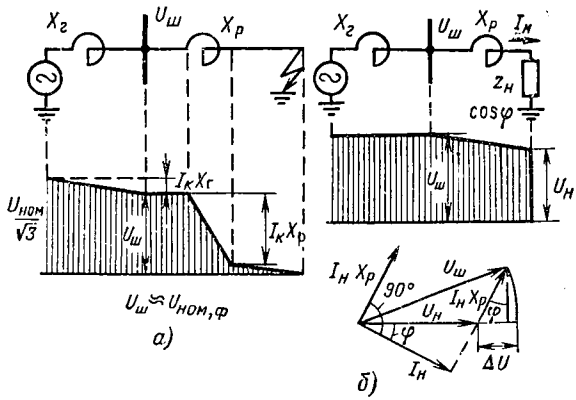


Рис. 20.2. Распределение напряжения в режимах КЗ и номинальном

Таким образом, при сделанных допущениях ток КЗ определяется только параметрами реактора.

Реактор обладает исключительно высокой надежностью. Поэтому выбор аппаратуры линии производится по току $I_{к2} \ll I_{к1}$, что значительно облегчает и удешевляет распределительное устройство.

Распределение напряжений и векторная диаграмма цепи для номинального режима показаны на рис. 20.2, *б*. В режиме КЗ падение напряжения на реакторе $I_к X_р \gg I_к X_г$, так как $X_р \gg X_г$ и напряжение на шинах относительно земли $U_ш$ мало отличается от номинального фазного напряжения $U_{ном}/\sqrt{3}$ (рис. 20.2, *а*). При номинальном режиме $X_р \ll Z_н$, поэтому падение напряжения на реакторе незначительно (рис. 20.2, *б*). Ток нагрузки $I_н$ отстает от напряжения $U_н$ на угол φ, поскольку нагрузка активно-индуктивная. Напряжение на шинах $U_ш$ равно напряжению на нагрузке плюс падение напряжения на реакторе $I_н X_р$. Представляет интерес потеря напряжения δU, равная арифметической разности: $\delta U = U_ш - U_н$. При номинальном режиме, когда в цепи протекает номинальный ток нагрузки $I_{ном}$, потеря напряжения определяется по формуле

$$\delta U_\% = \frac{\delta U \sqrt{3}}{U_{ном}} 100 = \frac{I_{ном} X_р \sin\varphi \sqrt{3}}{U_{ном}} 100 = x_{р\%} \sin\varphi.$$

При чисто индуктивной нагрузке $\varphi = 90°$ потеря напряжения равна падению напряжения на реакторе. При активно индуктивной нагрузке с $\cos\varphi = 0{,}8$ потеря напряжения равна 0,6 $x_{р\%}$. Обычно $x_{р\%} < 10$ %. Таким образом, в длительном режиме потеря напряжения на реакторе невелика. В специальных сдвоенных реакторах потеря напряжения в номинальном режиме еще меньше.

В номинальном режиме обмотка реактора нагревается проходящим током. Мощность, выделяемая обмоткой реактора в виде тепла, составляет несколько киловатт в реакторах на малые токи и несколько десятков киловатт в реакторах на большие токи ($I_{ном,р} = 2000$ А). При прохождении тока КЗ температура реактора быстро повышается. Поэтому в качестве основных параметров реактора вводятся длительный номинальный ток $I_{ном,р}$ и ток термической стойкости $I_т$, отнесенный к определенному времени $t_т$. Иногда термическая стойкость задается произведением $I_т\sqrt{t_т}$.

Если $x_{р\%} > 3$ %, то наибольший ток, проходящий через реактор,

$$I_{к,р} = I_{ном,р} \frac{100}{x_{р\%}}.$$

Этот ток берется за основу при расчете термической и электродинамической стойкости реактора.

Если $x_{р\%} < 3$ %, то при расчете тока КЗ желательно учитывать сопротивление источника питания.

При прохождении тока КЗ между реакторами и внутри реактора создаются электродинамические силы, которые стремятся его разрушить. Расчет этих сил рассмотрен в § 1.5. Механическая прочность реактора характеризуется ударным током электродинамической стойкости. При расчете электродинамической стойкости за основу берется ударный ток

$$i_{уд} = 1{,}8\sqrt{2}\, I_{к,р}.$$

Одним из основных параметров реактора является его индуктивность L. Поскольку

$$x_{р\%} = \frac{I_{ном,р} X_р \sqrt{3}}{U_{ном}} 100\% \text{ и } X_р = \omega L_р,$$

то индуктивность реактора

$$L_р = \frac{10 U_н x_{р\%}}{I_{ном,р} \cdot 2\pi f \sqrt{3}},$$

где $U_{ном}$ — в киловольтах; $I_{ном,р}$ — в амперах.

Для бетонных реакторов, имеющих обмотку из n витков в виде катушки высотой h (м), толщиной b (м) и средним диаметром D (м), индуктивность (мГн) может быть определена по формуле Корндорфера

$$L = 10{,}5 n^2 D \left[\frac{D}{2(b+h)}\right]^p \cdot 10^{-4},$$

где $p = 3/4$ при $0{,}3 \leqslant \frac{D}{2(b+h)} \leqslant 1$ и $p = 1/2$ при $1 \leqslant \frac{D}{2(b+h)} \leqslant 3$.

Для дисковых катушек и катушек в виде тонкого цилиндра расчет индуктивности приведен в [20.1].

Применение ферромагнитных магнитопроводов позволяет резко снизить размеры реактора. Однако при больших токах происходит насыщение магнитопроводов и уменьшение индуктивности, что уменьшает токоограничивающий эффект реактора. В связи с этим применение магнитопроводов в токоограничивающих реакторах не получило распространения. Реактор потребляет из сети также реактивную мощность, равную для трехфазного комплекта

$$Q = 3 I^2_{ном} X_р \cdot 10^{-3} \text{ квар}.$$

Основными параметрами реактора являются:

1) номинальное напряжение $U_{ном}$; 2) номинальный ток

$I_{ном}$; 3) реактивное сопротивление $x_{р\%}$; 4) ток термической стойкости $I_т$ для времени t; 5) ток динамической стойкости $i_{уд}$.

20.2. КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРОВ

Наиболее распространены бетонные реакторы. На рис. 20.3 представлен трехфазный комплект таких реакторов. Из многожильного провода *1* соответствующего сечения намотаны катушки реакторов *A, B, C*. Заливкой в специальные формы получаются бетонные вертикальные стойки — колонны *2*, которые скрепляют между собой отдельные витки катушки. Торцы колонн имеют шпильки с изоляторами *3, 4*.

Для получения необходимой прочности электрической изоляции после затвердевания бетона реактор подвергают интенсивной сушке под вакуумом и пропитке влагостойким изоляционным лаком.

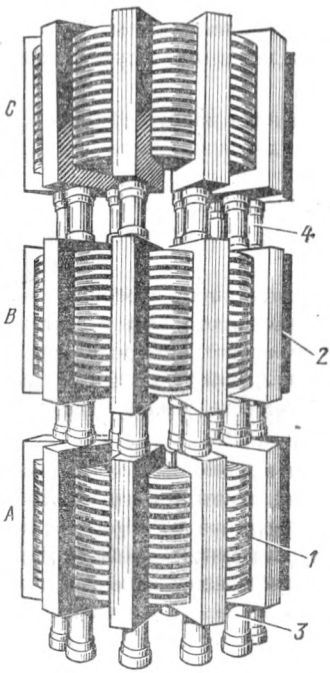


Рис. 20.3. Трехфазный комплект реакторов

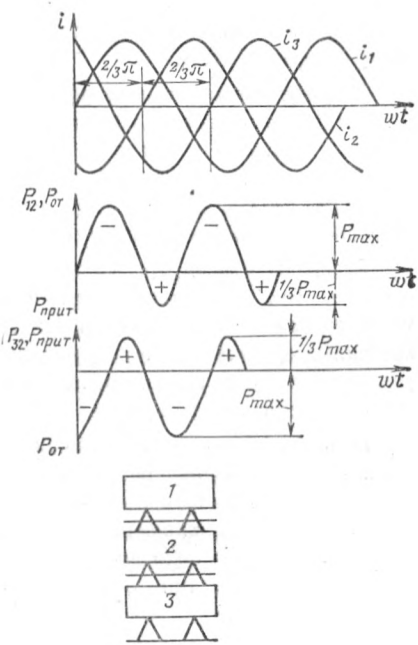


Рис. 20.4. Изменение во времени электродинамических усилий, действующих между реакторами

Между отдельными витками в ряду и между рядами выдерживается значительный зазор $(3{,}5 \div 4{,}5) \cdot 10^{-2}$ м, что улучшает охлаждение отдельных витков и повышает электрическую прочность изоляции.

При больших номинальных токах (более 400 А) применяется несколько параллельных ветвей. Для равномерного распределения тока по ветвям применяется транспозиция витков. Все витки ветвей должны быть одинаково расположены относительно оси реактора.

В качестве обмоточного провода используется многожильный медный или алюминиевый кабель большого сечения. Кабель покрывается несколькими слоями кабельной бумаги толщиной $0{,}12 \cdot 10^{-3}$ м и хлопчатобумажной оплеткой. Общая толщина изоляции примерно $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальная допустимая температура при длительном режиме не выше 105, при КЗ — не выше 250 °С.

Охлаждение реакторов, как правило, естественное.

В трехфазном комплекте (рис. 20.3) наибольшему нагреву подвергается верхний реактор, поскольку подходящий снизу воздух уже подогрет реакторами, расположенными ниже. Ввиду выделения реактором большой мощности в распределительном устройстве должны быть предусмотрены специальные каналы для охлаждающего воздуха, особенно при больших токах.

Мощное магнитное поле реактора замыкается вокруг обмотки. Все ферромагнитные тела в этом поле создают дополнительные активные потери мощности и могут нагреваться до очень высоких температур. Для уменьшения этих потерь все ферромагнитные детали (балки, арматура железобетонных стен) удаляются от обмотки на расстояние, не меньшее ее внешнего радиуса.

Расстояние между реакторами определяется высотой опорных изоляторов. Так как при напряжении 6 — 10 кВ высота этих изоляторов мала, то при больших токах в реакторах возникают электродинамические силы, которые могут разрушить изоляторы, работающие и на сжатие, и на разрыв. Изменение электродинамического усилия, действующего на изоляторы, во времени показано на рис. 20.4.

В наиболее тяжелых условиях работают изоляторы верхнего реактора. Для уменьшения разрывающего усилия, действующего на изоляторы, изменяют направление поля среднего реактора на обратное. При этом большое отталкивающее усилие становится притягивающим. Изменение направления поля среднего реактора достигается изменением направления его намотки относительно направления намотки крайних реакторов. Реакторы, предназначенные для вертикальной установки в комплектах, имеют маркировку *В* (верхний), *С* (средний) и *Н* (нижний).

Если при расчете электродинамических сил пренебречь влиянием третьей фазы, то по расчетным формулам § 1.5 и 1.8 можно найти мак-

симальные значения отталкивающей и притягивающей сил, Н, действующих на изоляторы:

$$P_{\text{от}} = \frac{1}{4}(i_{\text{уд}}\, w)^2\, \psi; \qquad P_{\text{прит}} = \frac{3}{4}(i_{\text{уд}}\, w)^2\, \psi,$$

где $i_{\text{уд}}$ — ударный ток,

$$i_{\text{уд}} = 1{,}8\sqrt{2}\,\frac{100}{x_{\text{р}\%}} I_{\text{ном.р}},$$

где w — число витков реактора; ψ — коэффициент, который берется по рис. 1.11.

Силы, действующие на каждый изолятор, соответственно равны:

$$P_{\text{раст}} = \frac{P_{\text{от}}}{N} - \frac{Mg}{N}; \qquad P_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{прит}}}{N} + \frac{Mg}{N},$$

где M — масса реактора; N — число изоляторов (колонн); g — ускорение свободного падения.

Под воздействием массы реактора изоляторы сжимаются, а растягивающая сила уменьшается.

В реакторах на большие токи электродинамические силы при вертикальной установке в аварийном режиме столь велики, что изоляторы не могут обеспечить необходимую электродинамическую стойкость. В этих случаях приходится прибегать к горизонтальной установке реакторов. Расстояние между осями может быть выбрано достаточно большим. Расчет динамической стойкости для этого случая рассмотрен в [20.1].

Бетонные реакторы применяются в закрытых распределительных устройствах при напряжении не выше 35 кВ. Недостатком их являются большие габаритные размеры и массы. Ведутся работы по уменьшению массы и габаритных размеров таких реакторов за счет применения современных изоляционных материалов.

При напряжениях более 35 кВ и для установки на открытой части подстанций применяются реакторы в масляном исполнении (рис. 20.5). В стальной бак *1* с трансформаторным маслом погружена обмотка *2*. Применение масла позволяет уменьшить изоляционные расстояния между обмоткой и заземленными частями реактора и улучшить охлаждение обмотки за счет конвекции масла. В результате масса и габаритные размеры аппарата уменьшаются. Выводы обмотки присоединяются к контактам проходных изоляторов *4*.

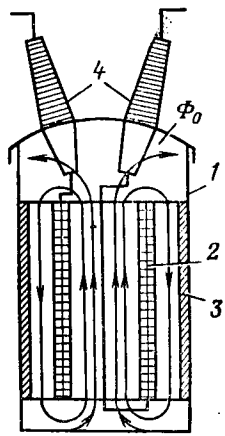


Рис. 20.5. Масляный реактор

Переменный магнитный поток реактора Φ_0 замыкается по стенкам бака, что приводит к его нагреву до недопустимых температур из-за появления вихревых токов. Чтобы избежать этого, внутри бака *1* устанавливается короткозамкнутый виток в виде экрана *3*. Как показано в § 5.3, такой виток увеличивает магнитное сопротивление цепи и, следовательно, уменьшает магнитный поток, замыкающийся через бак, и вызванные этим потоком потери на вихревые токи.

В настоящее время разработаны тороидальные реакторы [20.3]. Как и в магнитных усилителях, обмотка такого реактора имеет тороидальную форму, но не содержит магнитопровод. При такой форме обмотки внешнее поле рассеяния практически отсутствует и нагрев бака не возникает. Тороидальные реакторы на напряжение 110 кВ и выше имеют более высокие технические и экономические показатели по сравнению с конструкцией на рис. 20.5.

20.3. СДВОЕННЫЕ РЕАКТОРЫ

а) **Принцип работы.** Стремление к уменьшению потерь напряжения на реакторе в номинальном режиме, к упрощению и удешевлению распределительных устройств привело

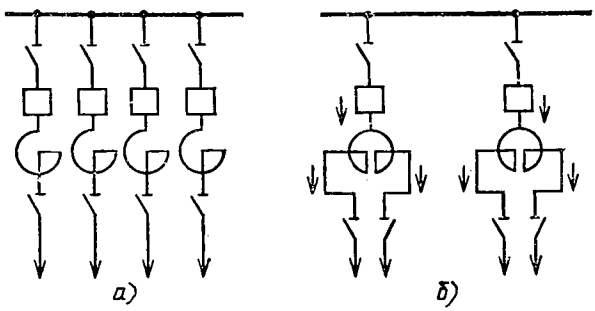


Рис. 20.6. Включение одинарных и сдвоенных реакторов

к созданию сдвоенных реакторов. При обычных реакторах (рис. 20.6, *а*) каждая отходящая линия имеет свой реактор, рассчитанный на номинальный ток линии. Каждая трехфазная группа реакторов размещается в специальной ячейке распредустройства.

В сдвоенных реакторах (рис. 20.6, *б*) реакторы соседних ветвей сближены так, что между ними существует сильная магнитная связь. Совмещение в одном реакторе двух умень-

шает габариты аппарата, удешевляет и упрощает распредустройство.

В номинальном режиме магнитные поля реакторов направлены встречно и оказывают размагничивающее действие друг на друга. В результате индуктивное сопротивление ветви падает. Соответственно уменьшается падение напряжения на реакторе. Падение напряжения на ветви реактора $\Delta U_в$ при номинальном токе

$$\Delta U_в = I_{ном,в}\left(X_{р,в} - X_M\right) = I_{ном,р} X_{р,в}\left(1 - \frac{X_M}{X_{р,в}}\right) =$$

$$= I_{ном,р} X_{р,в}(1 - k),$$

где $X_{р,в}$ — индуктивное сопротивление ветви реактора; $X_M = \omega M$ — сопротивление взаимной индукции ветвей реактора (M — коэффициент взаимной индуктивности); $k = M/L_{р,в}$ — коэффициент связи ветвей реактора; $L_{р,в}$ — индуктивность одной ветви.

Чем больше коэффициент связи, тем меньше падение напряжения в ветви. С точки зрения уменьшения падения напряжения в номинальном режиме желательно увеличение коэффициента связи k.

Для увеличения коэффициента связи реакторы должны быть возможно ближе друг к другу.

При КЗ в одной из ветвей падение напряжения на реакторе в основном определяется ее сопротивлением $X_{р,в}$. Влияние соседней ветви, обтекаемой номинальным током, мало, так как размагничивающее действие этой ветви незначительно.

Если первая ветвь реактора разомкнута, а во второй проходит ток КЗ, то в реакторе первой ветви наводится дополнительная ЭДС, равная $E = I_к k X_{р,в}$.

В результате напряжение на первой ветви реактора возрастает и может достигнуть удвоенного значения [18.2].

При одновременном КЗ в обоих отходящих от реактора ветвях между ними возникают большие электродинамические силы. Это происходит из-за того, что, во-первых, реакторы близко расположены друг к другу и, во-вторых, возрастает ток КЗ, так как падает реактивное сопротивление ветвей.

Для ограничения перенапряжений и электродинамических сил коэффициент связи берется в пределах от 0,3 до 0,5.

б) **Конструкция и основные параметры сдвоенного реактора.** Исследования [20.1] показали, что бетонные сдвоенные реакторы без приме-

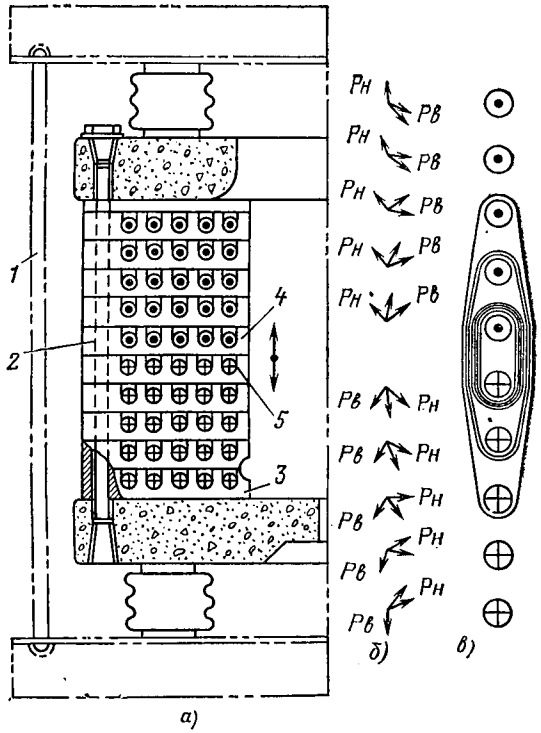


Рис. 20.7. Конструкция сдвоенного реактора

нения специальных мер подвержены разрушению при одновременном КЗ в обеих ветвях. Увеличение электродинамической стойкости достигается в сборной конструкции. На рис. 20.7, *а* показана в разрезе левая половина такого реактора. Стяжка реактора осуществляется с помощью металлических стержней *1* и стержней *2* из изоляционного материала. Катушка реактора уложена на изоляционных прокладках *3*.

Векторы, помеченные $P_н$, обозначают силу взаимодействия витка с нижней частью реактора. Векторы, помеченные $P_в$, — силы, действующие на виток со стороны верхней части реактора. Векторы без пометки являются результирующей силой.

Наибольшая отталкивающая сила действует на витки рядов *4* и *5*, расположенные близко друг к другу. Для получения необходимой электродинамической стойкости близлежащие ряды ветвей реактора бандажируются стеклянной лентой, как это показано на рис. 20.7, *в*.

Расчет динамической стойкости сдвоенных реакторов дан в [20.1].

Для снижения возможности одновременного КЗ обе ветви реактора не должны проходить близко друг к другу [1.3].

Основные параметры сдвоенного реактора:

1) номинальный длительный ток каждой ветви;

2) индуктивное сопротивление (в процентах) одной ветви (при отсутствии тока в другой)

$$x_{\text{р,в}\%} = \frac{I_{\text{ном,р}} X_{\text{р,в}} \sqrt{3}}{U_{\text{ном}}} 100;$$

3) коэффициент связи

$$k = \omega M / X_{\text{р,в}} = M / L_{\text{р,в}};$$

4) электродинамическая стойкость каждой ветви, определяется усилиями, возникающими между витками каждой ветви и между ветвями соседних фаз (при двух- и трехфазных КЗ). При одновременном КЗ на обеих ветвях одного реактора возникают усилия, разрывающие реактор, так как токи в ветвях направлены встречно. Обычно динамическая стойкость при таких повреждениях в 2—3 раза меньше, чем при КЗ в одной ветви;

5) термическая стойкость одной ветви.

Глава двадцать первая

РАЗРЯДНИКИ

21.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При работе электрических установок возникают напряжения, которые могут значительно превышать номинальные значения (перенапряжения). Эти перенапряжения могут пробить электрическую изоляцию элементов оборудования и вывести установку из строя. Чтобы избежать пробоя электрической изоляции, она должна выдерживать эти перенапряжения, однако габаритные размеры оборудования получаются чрезмерно большими, так как перенапряжения могут быть в 6—8 раз больше номинального напряжения. С целью облегчения изоляции возникающие перенапряжения ограничивают с помощью разрядников и изоляцию оборудования выбирают по этому ограниченному значению перенапряжений. Возникающие перенапряжения делят на две группы: внутренние (коммутационные) и атмосферные. Первые возникают при коммутации электрических цепей (катушек индуктивностей, конденсаторов, длинных линий),

дуговых замыканиях на землю и других процессах. Они характеризуются относительно низкой частотой воздействующего напряжения (до 1000 Гц) и длительностью воздействия до 1 с. Вторые возникают при воздействии атмосферного электричества, имеют импульсный характер воздействующих напряжений и малую длительность (десятки микросекунд). Электрическая прочность изоляции при импульсах зависит от формы импульса, его амплитуды. Зависимость максимального напряжения импульса от времени разряда называется вольт-секундной характеристикой. Для изоляции с неоднородным электрическим полем характерна резко падающая вольт-секундная характеристика. При равномерном поле вольт-секундная характеристика пологая и идет почти параллельно оси времени.

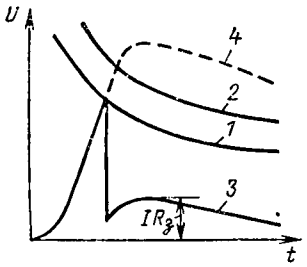


Рис. 21.1. Согласование характеристик разрядника и защищаемого оборудования

Основным элементом разрядника является искровой промежуток. Вольт-секундная характеристика этого промежутка (кривая *1* на рис. 21.1) должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемого оборудования (кривая *2*). *При появлении перенапряжения промежуток должен пробиться раньше, чем изоляция защищаемого оборудования.* После пробоя линия заземляется через сопротивление разрядника. При этом напряжение на линии определяется током *I*, проходящим через разрядник, сопротивлениями разрядника и заземления $R_з$. Чем меньше эти сопротивления, тем эффективнее ограничиваются перенапряжения, т. е. больше разница между возможным (кривая *4*) и ограниченным разрядником перенапряжением (кривая *3*). Во время пробоя через разрядник протекает импульс тока.

Напряжение на разряднике при протекании импульса тока данного значения и формы называется остающимся напряжением. Чем меньше это напряжение, тем лучше качество разрядника.

После прохождения импульса тока искровой промежуток оказывается ионизированным и легко пробивается номинальным фазным напряжением. Возникает КЗ на землю, при котором через разрядник протекает ток промышленной

частоты, который называется сопровождающим. Сопровождающий ток может изменяться в широких пределах.

Чтобы избежать выключения оборудования от релейной защиты, этот ток должен быть отключен разрядником в возможно малое время (около полупериода промышленной частоты).

К разрядникам предъявляются следующие требования.

1. Вольт-секундная характеристика разрядника должна идти ниже характеристики защищаемого объекта и должна быть пологой.

2. Искровой промежуток разрядника должен иметь определенную гарантированную электрическую прочность при промышленной частоте (50 Гц) и при импульсах.

3. Остающееся напряжение на разряднике, характеризующее его ограничивающую способность, не должно достигать опасных для изоляции оборудования значений.

4. Сопровождающий ток частотой 50 Гц должен отключаться за минимальное время.

5. Разрядник должен допускать большое число срабатываний без осмотра и ремонта.

21.2. ТРУБЧАТЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Трубчатый разрядник (рис. 21.2) при нормальной работе установки отделен от линии воздушным промежутком S_2. При появлении перенапряжения пробиваются промежутки S_1 и S_2 и импульсный ток отводится в землю. После прохождения импульсного тока по разряднику течет сопровождающий ток промышленной частоты. В узком канале обоймы (трубки) *1* из газогенерирующего материала (винипласта или фибры) в промежутке S_1 между электродами *2* и *3* загорается дуга. Внутри обоймы поднимается давление. Образующиеся газы могут выходить через отверстие в кольцевом электроде *3*.

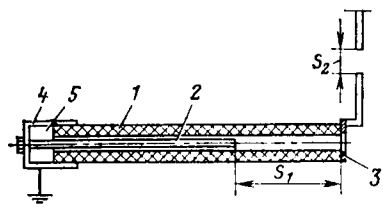


Рис. 21.2. Трубчатый разрядник

При прохождении тока через нуль происходит гашение дуги под действием охлаждения промежутка S_1 газами, выходящими из разрядника.

В заземленном электроде *4* имеется буферный объем *5*, где накапливается потенциальная энергия сжатого газа. При проходе тока через

нуль создается газовое дутье из буферного объема, что способствует эффективному гашению дуги (§ 18.3).

Предельный отключаемый ток промышленной частоты определяется механической прочностью обоймы и составляет 10 кА для фибробакелитовой обоймы и 20 кА для винипластовой, упрочненной стеклотканью на эпоксидной смоле. Сопровождающий ток частотой 50 Гц определяется местом расположения разрядника и меняется в довольно широком диапазоне в зависимости от режима работы энергосистемы. Поэтому должны быть известны минимальные и максимальные значения тока КЗ в месте установки разрядника.

Минимальный ток разрядника определяется гасящей способностью трубки. Чем меньше диаметр выхлопного канала, чем больше его длина, тем меньше нижний предел отключаемого тока. Однако при больших токах в трубке возникает высокое давление. При недостаточной механической прочности трубки может произойти разрушение разрядника. В настоящее время выпускаются винипластовые разрядники высокой прочности с наибольшим отключаемым током до 20 кА.

Работа трубчатого разрядника сопровождается сильным звуковым эффектом и выбросом газов. Так, зона выброса газов разрядника РТВ-110 имеет вид конуса с диаметром 3,5 и высотой 2,2 м. При размещении разрядников необходимо, чтобы в эту зону не попадали элементы, находящиеся под высоким потенциалом.

Защитная характеристика разрядника в значительной степени зависит от вольт-секундной характеристики искрового промежутка. В трубчатом разряднике промежуток образован стержневыми электродами, имеющими крутую вольт-секундную характеристику из-за большой неоднородности электрического поля. В то же время электрическое поле в защищаемых аппаратах и оборудовании стремятся сделать равномерным с целью более полного использования изоляционных материалов и уменьшения габаритов и массы. При равномерном поле вольт-секундная характеристика получается пологой, практически мало зависящей от времени. В связи с этим трубчатые разрядники, имеющие крутую вольт-секундную характеристику, непригодны для защиты подстанционного оборудования. Обычно с их помощью защищается только линейная изоляция (изоляция, создаваемая подвесными изоляторами). При выборе трубчатого разрядника необходимо рассчитать возможный минимальный и максимальный ток КЗ в месте установки и по этим токам выбрать соответствующий разрядник. Номинальное напряжение разрядника должно соответствовать номинальному напряжению сети. Размеры внутреннего S_1 и внешнего S_2 промежутков (рис. 21.2) выбираются по специальным таблицам [4.3].

21.3. ВЕНТИЛЬНЫЕ РАЗРЯДНИКИ

Разрядник типа РВС-10 (разрядник вилитовый станционный на 10 кВ) показан на рис. 21.3, *а*. Основными элементами являются вилитовые кольца *1*, искровые промежутки *2* и рабочие резисторы *3*. Эти элементы расположены внутри фарфорового кожуха *4*, который с торцов имеет специальные фланцы *5* для крепления и присоединения разрядника.

Рабочие резисторы *3* изменяют свои характеристики при наличии влаги. Кроме того, влага, оседая на стенках и деталях внутри разрядника, ухудшает его изоляцию и создает возможность перекрытия. Для исключения проникновения влаги кожух разрядника герметизируется по торцам с помощью пластин *6* и уплотнительных резиновых прокладок *7*.

Работа разрядника происходит в следующем порядке.

При появлении перенапряжения пробиваются три последовательно включенных блока искровых промежутков *2* (рис. 21.3, *б*). Импульс то-

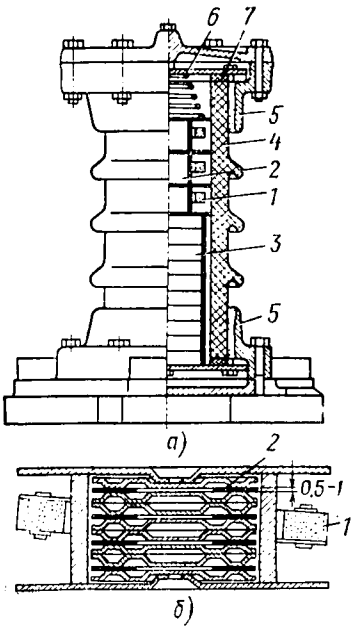


Рис. 21.3. Вентильный разрядник (*а*) и его искровые промежутки в увеличенном масштабе (*б*)

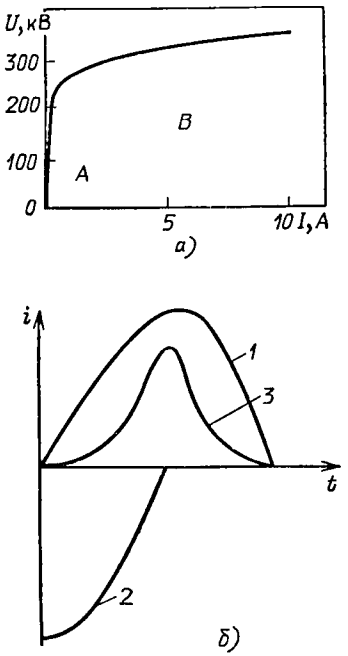


Рис. 21.4. Вольт-амперная характеристика вилитого резистора

ка при этом через рабочие резисторы замыкается на землю. Возникший сопровождающий ток ограничивается рабочими резисторами, которые создают условия для гашения дуги сопровождающего тока.

После пробоя искровых промежутков напряжение на разряднике $U_р = IR_р$.

Если сопротивление разрядника $R_р$, определяемое рабочими резисторами, линейное, то напряжение на разряднике растет пропорционально току и может стать выше допустимого для защищаемого оборудования. Для ограничения напряжения $U_р$ сопротивление $R_р$ выполняется нелинейным и с ростом тока уменьшается. Зависимость между напряжением и током в этом случае выражается как

$$U_р = AI^{\alpha},$$

где A — постоянная, характеризующая напряжение на сопротивлении $R_р$ при токе 1 А; α — показатель нелинейности. Случай, когда $\alpha=0$, является идеальным, так как напряжение $U_р$ не зависит от тока.

Описанные разрядники получили название вентильных, потому что при импульсных токах их сопротивление резко падает, что дает возможность пропустить большой ток при относительно небольшом падении напряжения.

В качестве материала нелинейных резисторов широко применяется вилит. В области больших токов его показатель нелинейности $\alpha=0{,}13 \div 0{,}2$. Типичная вольт-амперная характеристика вилитового резистора приведена на рис. 21.4, *а*. При небольших токах сопротивление $R_р$ велико и напряжение линейно растет с ростом тока (область A). При больших токах сопротивление резко уменьшается и напряжение $U_р$ почти не растет (область B).

Основу вилита составляют зерна карборунда SiC с удельным сопротивлением около 10^{-2} Ом·м. На поверхности карборундовых зерен создается пленка оксида кремния SiO_2 толщиной 10^{-7} м, сопротивление которой зависит от приложенного к ней напряжения. При небольших напряжениях удельное сопротивление пленки составляет 10^{4}—10^{6} Ом·м. При увеличении приложенного напряжения сопротивление пленки резко уменьшается, сопротивление определяется в основном зернами карборунда и падение напряжения ограничивается.

Рабочие резисторы изготавливаются в виде дисков диаметром 0,1—0,15 м и высотой $(20 \div 60) \cdot 10^{-3}$ м. С помощью жидкого стекла зерна карборунда прочно связываются между собой.

Вилит очень гигроскопичен. Для защиты от влаги цилиндрическая поверхность дисков покрывается изолирующей обмазкой. Торцевые поверхности являются контактными и металлизируются.

Обычно несколько рабочих резисторов в виде дисков соединяются последовательно (на рис. 21.3, *а* изображено 10 дисков). При наличии n дисков остающееся напряжение

$$U_{ост} = nAI^{\alpha}.$$

Для уменьшения остающегося напряжения число дисков n должно быть возможно меньше.

При прохождении тока температура дисков повышается. При протекании импульса тока большой амплитуды, но малой длительности (десятки микросекунд) резисторы не успевают нагреваться до высокой температуры. При длительном протекании даже небольших токов промышленной частоты (один полупериод равен 10 мс) *температура может превысить допустимое значение, диски теряют свои вентильные свойства, и разрядник выходит из строя.*

Предельно допустимая амплитуда импульса тока для диска диаметром 100 мм равна 10 кА при длительности импульса 40 мкс. Допустимая амплитуда прямоугольного импульса с длительностью 2000 мкс не превышает 150 А. Такие токи диск без повреждения пропускает 20—30 раз.

После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток, представляющий собой ток промышленной частоты. По мере приближения тока к нулевому значению сопротивление вилита резко увеличивается, что ведет к искажению синусоидальной формы тока. Увеличение сопротивления цепи ведет к уменьшению тока и угла сдвига фаз φ между током и напряжением ($\varphi \to 0$). На рис. 21.4, *б*, показаны кривые токов в рабочем резисторе. Здесь *1* — напряжение источника 50 Гц; *2* — кривая тока цепи, определяемого индуктивным сопротивлением X; *3* — кривая тока, определяемого рабочим резистором ($R_р \gg X$). Из-за нелинейности резистора $R_р$ уменьшается возвращающееся напряжение (напряжение промышленной частоты). Уменьшение скорости подхода тока к нулю уменьшает мощность дуги в области нулевого значения тока. Все это облегчает процесс гашения дуги, горящей между электродами разрядного промежутка. Благодаря применению латунных электродов в искровых промежутках после прохода тока через нуль около каждого катода образуется промежуток, электрическая прочность которого 1,5 кВ. Это обеспечивает гашение сопровождающего тока при первом прохождении тока через нуль и позволяет погасить дугу в искровых промежутках без применения специальных дугогасительных устройств.

Устройство искрового промежутка вентильного разрядника ясно из рис. 21.3, *б*. Форма электродов обеспечивает равномерное электрическое поле, что позволяет получить пологую вольт-секундную характеристику. Расстояние между электродами принимается $(0{,}5 \div 1) \cdot 10^{-3}$ м.

Возникновение заряда в закрытом объеме разрядника при малой длительности импульса тока затруднено. Для облегчения ионизации искрового промежутка между электродами помещается миканитовая прокладка. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха значитель-

но меньше, чем у входящей в состав миканита слюды, то в приэлектродном объеме воздуха возникают высокие градиенты электрического поля, вызывающие его начальную ионизацию. Образующиеся электроны приводят к быстрому формированию разряда в центре искрового промежутка.

Искровые промежутки последовательно соединяются, образуя блок (см. рис. 21.3, *б*). Обычно разрядник имеет несколько таких блоков. Результирующая вольт-секундная характеристика последовательно соединенных промежутков достаточно пологая.

Экспериментально установлено, что одиночный искровой промежуток способен отключить сопровождающий ток с амплитудой 80—100 А при действующем значении напряжения 1—1,5 кВ. Число единичных

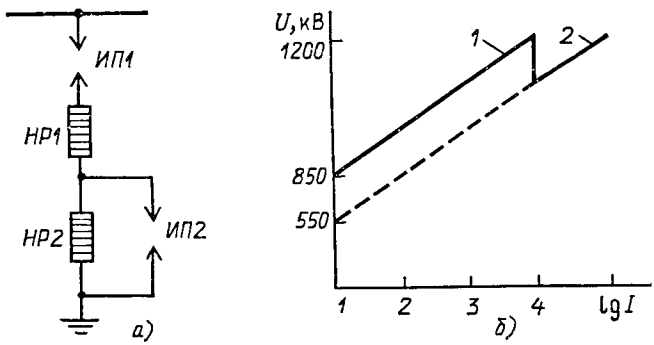


Рис. 21.5. Комбинированный разрядник с тервитовыми резисторами

промежутков выбирается исходя из этого напряжения. Количество дисков рабочего резистора должно быть таким, чтобы максимальное значение тока не превысило 80—100 А. При этом гашение дуги обеспечивается за один полупериод.

Для обеспечения равномерной нагрузки при промышленной частоте промежутки шунтируются нелинейными резисторами *1* (рис. 21.3). Термическая стойкость дисков рассчитана на пропускание сопровождающего тока в течение одного-двух полупериодов.

Внутренние перенапряжения имеют низкочастотный характер и могут длиться до 1 с. Вследствие малой термической стойкости вилит не может быть использован для ограничения внутренних перенапряжений. Для ограничения внутренних перенапряжений используется аналогичный вилиту материал тервит, обладающий большой термической стойкостью и повышенным показателем нелинейности $\alpha = 0{,}15 \div 0{,}29$.

Тервитовые диски используются в комбинированных разрядниках

(рис. 21.5, *а*), предназначенных для защиты как от внутренних (коммутационных), так и от внешних (атмосферных) перенапряжений. При внутренних перенапряжениях работают оба нелинейных резистора *НР1* и *НР2* (кривая *1* на рис. 21.5, *б*). При атмосферных перенапряжениях из-за большого тока напряжение на *НР2* пробивает промежуток *ИП2* и напряжение на защищаемой линии снижается (кривая *2*).

Вентильные разрядники работают бесшумно. Число срабатываний фиксируется специальным регистратором, который включается между нижним выводом разрядника и заземлением. Наиболее надежны электромагнитные регистраторы, якорь которых при прохождении импульсного тока воздействует на храповой механизм счетного устройства.

С помощью искровых промежутков, показанных на рис. 21.3, *б*, невозможно отключение токов 200—250 А. В этом случае для гашения дуги применяются камеры магнитного дутья с постоянным магнитом. Дуга, возникающая в искровом промежутке, под воздействием магнитного поля загоняется в узкую щель с керамическими станками. На этом принципе созданы разрядники на напряжение до 500 кВ. Увеличение диаметра дисков до 150 мм позволяет поднять их термическую стойкость. В результате комбинированные магнитно-вентильные разрядники позволяют ограничивать как внутренние, так и атмосферные перенапряжения.

Основные характеристики вентильного разрядника:

1. Напряжение гашения $U_{\text{гаш}}$ — наибольшее приложенное к разряднику напряжение промышленной частоты, при котором надежно обрывается сопровождающий ток. Это напряжение определяется свойствами разрядника. Напряжение промышленной частоты, прикладываемое к разряднику, зависит от параметров схемы. Если при КЗ на землю одной фазы на свободных фазах появляется перенапряжение, то напряжение гашения, прикладываемое к разряднику, определяется уравнением

$$U_{\text{гаш,сх}} = k_{\text{з}} U_{\text{ном}},$$

где $k_{\text{з}}$ — коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали; $U_{\text{ном}}$ — номинальное линейное напряжение сети. Для установок с заземленной нейтралью $k_{\text{з}} = 0{,}8$, для изолированной нейтрали $k_{\text{з}} = 1{,}1$.

2. Ток гашения $I_{\text{гаш}}$, под которым понимается сопровождающий ток, соответствующий напряжению гашения $U_{\text{гаш}}$.

3. Дугогасящее действие искрового промежутка характеризуется коэффициентом

$$k_{\text{гаш}} = U_{\text{пр}\sim}/U_{\text{гаш}},$$

где $U_{пр\sim}$ — напряжение пробоя частотой 50 Гц искрового промежутка.

4. Защитное действие нелинейного резистора характеризуется коэффициентом защиты

$$k_{защ} = U_{ост}/(\sqrt{2}U_{гаш}),$$

где $U_{ост}$ — напряжение на разряднике при импульсном токе 5—14 кА. Это напряжение должно быть на 20—25 % ниже разрядного напряжения защищаемой изоляции.

Расчет элементов разрядников рассмотрен в [4.4].

21.4. РАЗРЯДНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для защиты установок от перенапряжений постоянного тока могут быть применены вентильные разрядники. Однако гашение дуги постоянного тока значительно сложнее, чем переменного. Для использования околоэлектродного падения напряжения требуется очень большое число искровых промежутков, так как на каждой паре электродов напряжение не должно превышать 20—30 В.

Для гашения дуги целесообразно использовать магнитное дутье с помощью постоянных магнитов. Возникающая при этом электродинамическая сила с большой скоростью перемещает дугу в узкой щели из дугостойкого изоляционного материала. В результате интенсивного охлаждения дуги ее сопротивление увеличивается и ток прекращается.

Вентильный разрядник для сети с напряжением 3 кВ постоянного тока показан на рис. 21.6. Рабочий резистор *1* состоит из двух вилитовых дисков, соединенных с двумя искровыми промежутками *2* с магнитным гашением дуги. Надежное контактирование промежутков и дисков достигается с помощью пружины *3*, одновременно являющейся токоподводящим элементом. Основные элементы разрядника располагаются в фарфоровом кожухе *6*, который закрыт снизу крышкой *7*. Герметизация разрядника осуществляется крышкой *4* с резиновым уплотнением *5*.

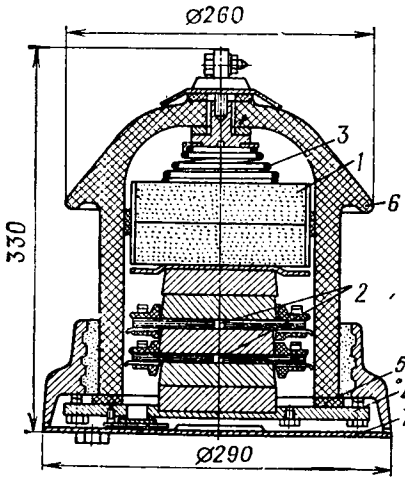


Рис. 21.6. Разрядник постоянного тока

21.5. ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

На основе оксида цинка, имеющего резко выраженную нелинейность вольт-амперной характеристики, разработана серия нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) на номинальное напряжение 110—500 кВ.

ОПН представляет собой нелинейный резистор с высоким коэффициентом нелинейности $\alpha = 0{,}04$ (против 0,1 — 0,2 для вилита). Он включается параллельно защищаемому объекту (между потенциальным выводом и землей) без разрядных промежутков. Благодаря высокой нелинейности при номинальном фазном напряжении через ОПН протекает ничтожный ток 1 мА. При увеличении напряжения сопротивление ОПН резко уменьшается, ток, протекающий через него, растет. При напряжении $2{,}2U_{\Phi}$ через ОПН протекает ток 10^4 А. После прохождения импульса напряжения ток в цепи ОПН определяется фазным напряжением сети.

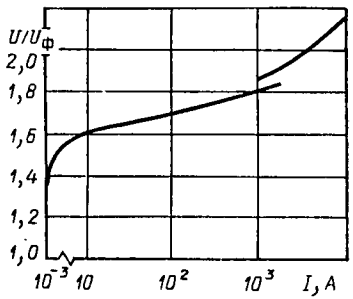


Рис. 21.7. Вольт-амперная характеристика ограничителя ОПН-500

ОПН ограничивают коммутационные перенапряжения до уровня $1{,}8U_{\Phi}$ и атмосферные перенапряжения до $(2 \div 2{,}4)U_{\Phi}$. Из вольт-амперной характеристики ОПН-500 (рис. 21.7) видно, что при снижении перенапряжений с $2U_{\Phi}$ до U_{Φ} ток, протекающий через резисторы, уменьшается в 10^6 раз. Сопровождающий ток, протекающий после срабатывания аппарата, невелик (миллиамперы), так же как и невелика мощность, выделяемая в резисторах. Это позволяет отказаться от последовательного включения нескольких искровых промежутков и дает возможность присоединять ОПН непосредственно к защищаемому оборудованию, что значительно повышает надежность работы.

Высокая нелинейность резисторов ОПН (для области больших токов $\alpha \approx 0{,}04$) позволяет значительно снизить перенапряжения и уменьшить габариты оборудования, особенно при напряжении 750 и 1150 кВ.

Габаритные размеры и масса ОПН намного меньше, чем у обычных вентильных разрядников того же класса напряжения.

Глава двадцать вторая

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

22.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для удобства измерения тока в установках высокого напряжения и изоляции измерительных приборов и устройств релейной защиты от высокого напряжения служат трансформаторы тока (ТТ). ТТ имеет замкнутый магнитопровод с двумя обмотками. Через первичную обмотку пропускается измеряемый ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам или реле. Первичная обмотка изо-

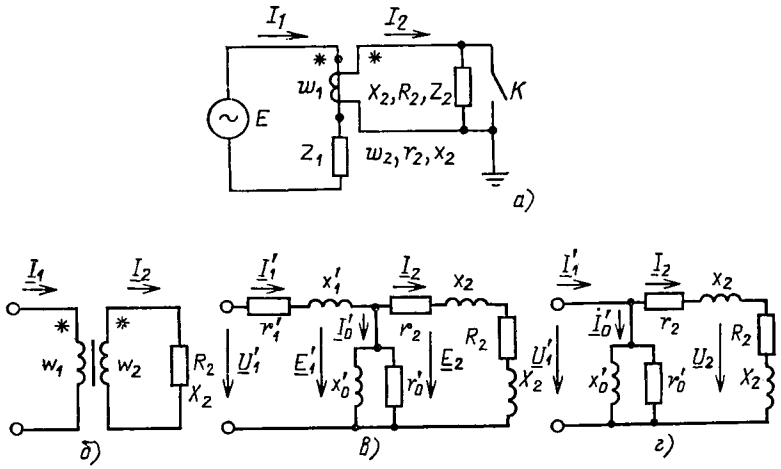


Рис. 22.1. Схема включения и схемы замещения трансформатора тока

лирована от вторичной в соответствии с классом изоляции аппарата. Один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется.

В случае повреждения изоляции приборы и реле остаются под потенциалом земли. Схема включения трансформатора тока ТА показана на рис. 22.1, *а*. В цепь вторичной обмотки включаются измерительные приборы или реле, являющиеся нагрузкой ТТ (R_2, X_2, Z_2). Ток I_1 в первичной обмотке ТТ определяется сопротивлением Z_1, которое на несколько порядков выше, чем входное сопротивление ТТ при любом сопротивлении нагрузки Z_2. Для анализа работы ТТ

целесообразно перейти от схемы замещения с магнитной связью обмоток (рис. 22.1, *б*) к схеме замещения с электрической связью обмоток (рис. 22.1, *в*). При этом параметры ТТ приводятся ко вторичной обмотке [22.1].

На этой схеме r_1', x_1' — параметры первичной обмотки, приведенные ко вторичной обмотке; r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки; x_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки; R_2, X_2 — параметры нагрузки и r_0', x_1' — параметры ветви намагничивания. В качестве коэффициента приведения параметров схемы к вторичной обмотке применено отношение числа витков w_2/w_1. При таком коэффициенте приведения значение x_2 может быть отрицательным. Параметр x_2 в Т-образной схеме замещения является чисто расчетным, и отрицательный знак не имеет физического смысла. Поскольку r_1' и x_1' включены последовательно с большим сопротивлением Z_1, то на работу ТТ они не влияют и схема замещения принимает вид, показанный на рис. 22.1, *г*.

Основными параметрами ТТ являются следующие:

номинальное напряжение — линейное напряжение энергосистемы, в которой ТТ должен работать. Это напряжение определяет изоляцию между первичной обмоткой, находящейся под высоким потенциалом, и вторичной, один конец которой заземлен;

номинальный первичный $I_{1\text{ном}}$ *и вторичный* $I_{2\text{ном}}$ *токи* — это длительные токи, которые аппарат может пропускать. ТТ обычно имеют запас по нагреву и позволяют длительно пропускать токи, которые примерно на 20 % выше номинального значения. Номинальный вторичный ток ТТ принимается равным 1 или 5 А;

номинальный коэффициент трансформации — отношение номинальных значений первичного и вторичного токов:

$$k_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}.$$

Действительный коэффициент трансформации не равен номинальному вследствие погрешности, вызываемой потерями в трансформаторе. Различают токовую погрешность и угловую;

токовая погрешность в процентах определяется выражением

$$\Delta I_{\%} = \frac{k_{\text{ном}} I_2 - I_1}{I_1} 100 = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} 100, \qquad (22.1)$$

где I_2 — вторичный ток; I_1' — первичный приведенный ток.

В соответствии с ГОСТ 7746—78 приняты следующие условные положительные направления токов: первичного тока — ток втекает в начало первичной обмотки, вторичного — ток вытекает из начала вторичной обмотки (рис. 22.1, *б*). Обе обмотки намотаны в одну сторону. При таком положительном направлении токов в ТТ без погрешностей векторы вторичного $\underline{I}_2$ и первичного $\underline{I}_1$ токов совпадают по фазе. В реальном ТТ между векторами $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ существует угол, который называется угловой погрешностью и измеряется в минутах. Если вторичный ток опережает первичный, то погрешность по углу положительная. Угловую погрешность необходимо учитывать при определении активной мощности цепи, равной $UI\cos\varphi$, где φ — угол между током $\underline{I}$ и напряжением $\underline{U}$, а также при измерениях энергии и в ряде релейных защит, работа которых зависит от угла φ.

Классы точности и нормированные погрешности приведены в [22.1]. Класс точности трансформатора определяется его погрешностью по току в процентах при первичном токе, равном 100—120 % $I_{1\text{ном}}$.

В зависимости от погрешности по ГОСТ 7746—78 различают классы точности 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10.

Наряду с токовой и угловой погрешностью ГОСТ 7746—78 предусмотрена полная погрешность ε, %, она характеризует относительный намагничивающий ток:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (k_{\text{ном}}\, i_2 - i_1)^2\, dt},$$

где I_1 — действующее значение первичного тока; i_2 — мгновенное значение вторичного тока; i_1 — мгновенное значение первичного тока; T — период частоты переменного тока (0,02 с);

номинальная нагрузка ТТ — сопротивление нагрузки $Z_{2\text{ном}}$, Ом, при котором он работает с заданным классом точности при номинальном значении $\cos\varphi_{2\text{ном}}=0{,}8$. Иногда применяется понятие номинальной мощности

$$P_{2\text{ном}} = I_{2\text{ном}}^2 Z_{2\text{ном}}.$$

Поскольку значение тока $I_{2\text{ном}}$ стандартизовано, то номинальное сопротивление нагрузки однозначно определяет и номинальную мощность трансформатора;

номинальная предельная кратность первичного тока по отношению к его номинальному значению, при которой полная погрешность достигает 5 или 10 %. Соответственно ТТ имеют класс точности 5Р и 10Р. Нагрузка и ее коэффициент мощности должны быть номинальными;

максимальная кратность вторичного тока — отношение наибольшего вторичного тока к его номинальному значению при номинальной вторичной нагрузке. Максимальная кратность вторичного тока определяется насыщением магнитопровода, когда дальнейшее возрастание первичного тока не ведет к возрастанию потока.

В аварийном режиме ТТ обтекаются током КЗ и их обмотки подвергаются воздействию больших токов;

динамическая стойкость ТТ (кратность) определяется отношением допустимого тока ударного КЗ к амплитуде номинального первичного тока;

термическая стойкость (кратность), задается отношением допустимого в течение 1 с тока КЗ к номинальному значению первичного тока.

Так как ток первичной обмотки задается сетью, то наибольшим термическим и динамическим воздействиям подвергается первичная обмотка. Вторичный ток часто ограничивается насыщением магнитопровода, и поэтому вторичная обмотка работает в облегченных условиях.

22.2. ЗАВИСИМОСТЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

а) **Векторная диаграмма трансформатора тока.** Положительное направление ЭДС первичной обмотки $\underline{E}_1'$ совпадает с положительным направлением тока $\underline{I}_1'$ (рис. 22.2). Поскольку поток Φ_0 пронизывает и первичную и вторичную обмотки, то ЭДС вторичной обмотки $\underline{E}_2$ совпадает по направлению с ЭДС $\underline{E}_1'$. Для вторичной обмотки при принятом положительном направлении тока $\underline{I}_2$, воспользовавшись вторым законом Кирхгофа, можно написать

$$\underline{I}_2 R_2 + j\underline{I}_2 X_2 + \underline{I}_2 r_2 + j\underline{I}_2 x_2 = -\underline{E}_2 \ldots \qquad (22.2)$$

Знак минус перед $\underline{E}_2$ обусловлен тем, что ЭДС $\underline{E}_2$ направлена встречно току $\underline{I}_2$.

Построим векторную диаграмму вторичной цепи. ЭДС $\underline{E}_2$ отстает от потока Φ_0 на угол 90° $\left(\underline{E}_2 = -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}\right)$. Про-

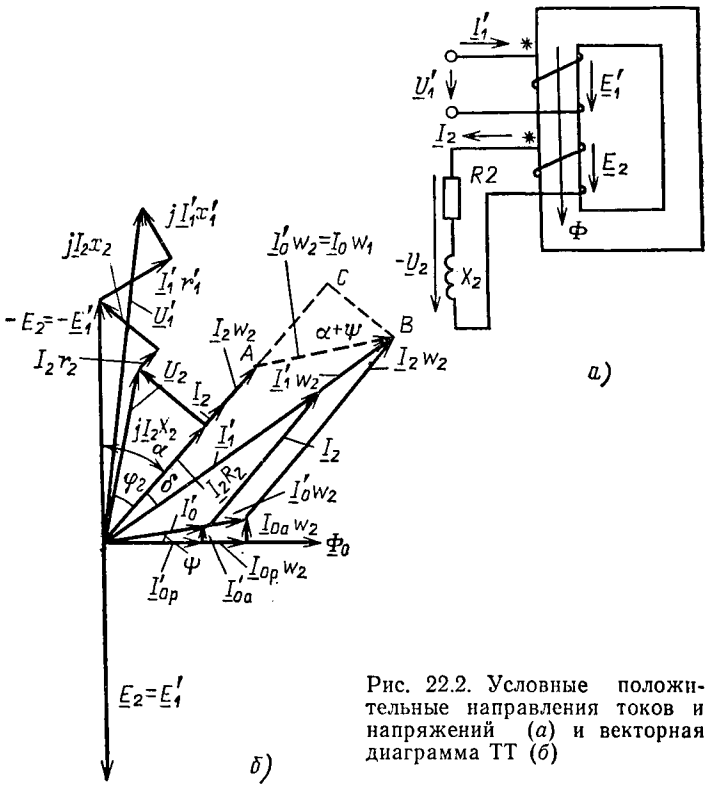


Рис. 22.2. Условные положительные направления токов и напряжений (*а*) и векторная диаграмма ТТ (*б*)

водим вектор $-\underline{E}_2$ и строим треугольники падения напряжения на нагрузке R_2, X_2 и на вторичной обмотке r_2, x_2. Падение напряжения $\underline{I}_2(R_2+jX_2)$ есть напряжение на нагрузке $\underline{U}_2$. Первичный ток $\underline{I}_1'$ можно найти, воспользовавшись законом полного тока

$$\underline{I}_0w_1=\underline{I}_1w_1-\underline{I}_2w_2 \text{ или } \underline{I}_1w_1=\underline{I}_0w_1+\underline{I}_2w_2\ldots \quad (22.3)$$

Введем приведенный первичный ток $\underline{I}_1'=\underline{I}_1w_1/w_2$ и намагничивающий ток $\underline{I}_0'=\underline{I}_0w_1/w_2$. Тогда $\underline{I}_1'=\underline{I}_0'+\underline{I}_2$. Намагничивающий ток $\underline{I}_0'$ имеет активную составляющую $\underline{I}_{0a}'$, которая необходима для преодоления активных потерь в стали магнитопровода (сопротивление $X_{мст}$). Составляющая $\underline{I}_{0p}'$ необходима для проведения потока Φ_0

через активное сопротивление стали магнитопровода R_m (§ 5.3). Для первичной цепи можно написать

$$-\underline{E}_2 + \underline{I}'_1 r'_1 + j\underline{I}'_1 x'_1 = \underline{U}'_1 \text{ или } \underline{U}'_1 = -\underline{E}'_1 + \underline{I}'_1 r'_1 + j\underline{I}'_1 x'_1;$$

$$\underline{E}'_1 = \underline{E}_2.$$

Прибавив к вектору $-\underline{E}'_1$ падение напряжения от тока $\underline{I}'_1$ на сопротивлении $r'_1 + jx'_1$, получим напряжение на первичной обмотке U'_1.

Если бы намагничивающий ток I_0 был равен нулю, то соблюдалось бы равенство первичных и вторичных МДС $F_2 = F_1$ или для модулей $I_1/I_2 = w_2/w_1 = I_{1\,\text{ном}}/I_{2\text{ном}} = k_{\text{ном}}$.

В этом случае токовая погрешность в соответствии с (22.1) равна нулю. В действительности $I_0 \neq 0$.

Из (22.1) можно получить

$$\Delta I_{\%} = -\frac{F_1 - F_2}{F_1}\,100.$$

Учитывая, что угол δ мал, за разницу $F_1 - F_2$ можно взять проекцию вектора $\underline{I}_0 w_2$ на ось $\underline{I}_2$ (отрезок AC). Таким образом, погрешность по току пропорциональна отрезку AC. Воспользовавшись (22.1) и рис. 22.2, получим погрешность по току, %,

$$\Delta I_{\%} = -\frac{I_0 w_1}{F_1}\sin(\alpha + \psi)\,100 \qquad (22.4)$$

и погрешность по углу в угловых минутах

$$\delta' = 3440\frac{I_0 w_1}{F_1}\cos(\alpha + \psi), \qquad (22.5)$$

где α — угол между вторичной ЭДС — E_2 и током I_2; ψ — угол потерь в сердечнике, равный $\operatorname{arctg}(I_{0a}/I_{0p})$.

Чем меньше намагничивающий ток, тем меньше погрешность и по току, и по углу.

Намагничивающий ток связан с напряженностью поля H законом полного тока

$$Hl = I_0 w_1, \qquad (22.6)$$

где l — средняя длина магнитопровода. Чем меньше H, тем меньше $I_0 w_1$.

Поток Φ_{0m} определяет вторичную ЭДС

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_{0m}.$$

Следовательно, чем больше E_2, тем больше поток Φ_{0m}. С ростом Φ_{0m} увеличиваются H, МДС $I_0 w_1$ и погрешность

$\Delta I\%$. Для уменьшения погрешности сопротивление вторичной цепи делается возможно меньшим, так как при этом уменьшается $E_2 = I_2\sqrt{(R_2 + r_2)^2 + (X_2 + x_2)^2}$. В обычных силовых трансформаторах, являющихся источником напряжения, сопротивление нагрузки много больше сопротивления обмоток, а выходная мощность $P_2 = U_2^2/Z_{2н}$ обратно пропорциональна сопротивлению нагрузки $Z_{2н}$. Ток нагрузки также обратно пропорционален ее сопротивлению: $I_2 = U_2/Z_{2н}$. В ТТ сопротивление вторичной обмотки соизмеримо, а иногда даже больше сопротивления нагрузки. При $I_0 w_1 = 0$ существует равенство МДС $F_1 = F_2$. При этом вторичный ток $I_2 = I_1 w_1/w_2$ определяется первичным током I_1 и от сопротивления нагрузки Z_2 не зависит. ТТ является источником тока. Выходная мощность $P_2 = I_2^2 Z_{2н}$ и пропорциональна сопротивлению нагрузки. При изменении нагрузки $Z_{2н}$ ток $I_{2н}$ не меняется, так как он определяется первичным током $I_{1н}$.

б) **Зависимость погрешности от первичного тока.** В процессе работы первичный ток ТТ изменяется в широких пределах — примерно от 5 % $I_{ном}$ до тока КЗ. Ради упрощения можно положить, что в (22.4) $\sin(\alpha + \psi) = 1$. Тогда

$$\Delta I = I_0 w_1/F_1. \tag{22.7}$$

Так как $I_1 w_1 \approx I_2 w_2$, то

$$\Delta I = I_0 w_1/F_2, \tag{22.8}$$

но

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_{02}} = \frac{4{,}44 f w_2 B_m S}{Z_{02}}, \tag{22.9}$$

где

$$Z_{02} = R_2 + r_2 + j(X_2 + x_2).$$

Подставив (22.6) и (22.9) в (22.8), получим

$$\Delta I = \frac{H l Z_{02}}{4{,}44 f w_2^2 B_m S}; \tag{22.10}$$

поскольку $B_m/H = \mu_a$, то

$$\Delta I = \frac{Z_{02}}{4{,}44 f w_2^2 \mu_a S}. \tag{22.11}$$

При изменении первичного тока изменяется только проницаемость μ_a.

Если $F_1 \approx F_2$, то

$$F_1 = F_2 = \frac{4{,}44 f \omega_2^2 S}{Z_{02}} B_m, \qquad (22.12)$$

т. е. с ростом первичного тока индукция в магнитопроводе растет линейно.

Абсолютная магнитная проницаемость материала μ_a и индукция B_m связаны кривой $\mu_a(B_m)$ на рис. 22.3. На том же рисунке приведена кривая $B_m(H)$. С ростом первичного тока вначале μ_a увеличивается и погрешность падает, достигая при $B_{опт}$ минимального значения. При дальнейшем росте первичного тока проницаемость падает из-за насыщения магнитопровода, а погрешность ΔI увеличивается.

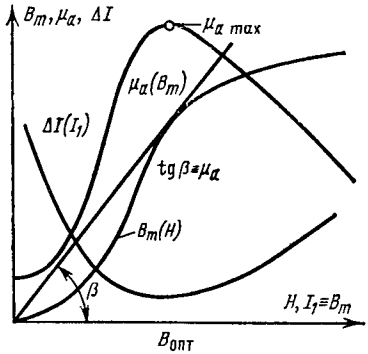


Рис. 22.3. Зависимость погрешности ТТ от первичного тока

ТТ не должен иметь больших погрешностей при номинальном токе и токе КЗ. Так как индукция насыщения лежит в области 2 Тл, то в нескомпенсированных ТТ номинальное значение индукции выбирают в пределах 0,06 — 0,1 Тл. В силовых трансформаторах индукция выбирается 1,45—1,7 Тл и при работе она меняется мало.

При отсутствии компенсации погрешность по току всегда отрицательна и с ростом первичного тока изменяется по U-образной кривой. Аналогично зависит от тока угловая погрешность, но она имеет положительный знак.

Для получения определенного класса точности погрешность ТТ должна находиться в допустимых пределах. Так, погрешности для ТТ класса точности 0,5 должны лежать внутри области, ограниченной ломаными линиями *3* (рис. 22.4) при нагрузке $(0{,}25 \div 1) Z_{2ном}$ и $\cos \varphi_2 = 0{,}8$.

Для магнитных материалов, применяемых в ТТ, в рабочем диапазоне индукций (0,06—0,1 Тл) кривую намагничивания можно аппроксимировать уравнением

$$H = 0{,}82 B_m^{0{,}6}. \qquad (22.13)$$

Введем отношение (кратность) первичного I_1 и вторичного I_2 токов к их номинальному значению:

$$I_1/I_{1\text{ном}} \simeq I_2/I_{2\text{ном}} = n.$$

Тогда погрешность ΔI можно выразить через индукцию B_m:

$$\Delta I = \frac{Hl}{nI_{1\text{ном}}w_1} = \frac{l}{nI_{1\text{ном}}w_1}\,0{,}82B_m^{0,6}. \qquad (22.14)$$

Величину B_m выразим через ток $I_{2\text{ном}}$:

$$B_m = \frac{nI_{2\text{ном}}Z_{02}}{4{,}44fw_2S} = \frac{nI_{2\text{ном}}^2Z_{02}}{4{,}44fI_{2\text{ном}}w_2S} = \frac{nI_{2\text{ном}}^2Z_{02}}{4{,}44fI_{1\text{ном}}w_1S}. \qquad (22.15)$$

Подставив (23.15) в (23.14), получим

$$\Delta I = \frac{0{,}82l}{nI_{1\text{ном}}w_1}\left(\frac{nI_{2\text{ном}}^2Z_{02}}{4{,}44fI_{1\text{ном}}w_1S}\right)^{0,6} =$$

$$= \frac{0{,}82lI_{2\text{ном}}^{1,2}Z_{02}^{0,6}}{(4{,}44f)^{0,6}n^{0,4}\left(I_{1\text{ном}}w_1\right)^{1,6}S^{0,6}}. \qquad (22.16)$$

Из (22.16) следует, что погрешность по току резко возрастает при уменьшении номинальной первичной МДС $I_{1\text{ном}}w_1$.

Наиболее рациональна конструкция ТТ с одновитковой первичной обмоткой в виде шины или стержня. Однако для получения высокого класса точности (классы 1; 0,5) первичная номинальная МДС должна быть не ниже определенной величины. Для современных магнитных материалов и разработанных одновитковых конструкций при классе точности 0,5 минимальный первичный ток должен быть не менее 400—900 А. При токах менее 400 А первичная обмотка выполняется многовитковой.

в) **Влияние сопротивления нагрузки.** Увеличение нагрузки Z_2 ведет к росту сопротивления Z_{02}. В соответствии с (22.16) погрешность возрастает пропорционально $Z_{02}^{0,6}$. С целью снижения погрешности необходимо уменьшать активное r_2 и реактивное x_2 сопротивления вторичной обмотки. При уменьшении Z_{02}, допустим, в 2 раза, уменьшаются в 2 раза ЭДС E_2 и индукция B_m. При этом упадут напряженность поля H и МДС I_0w_1. В соответствии с равенством $F_2 \approx F_1 — I_0w_1$ вторичный ток увеличится из-за уменьшения I_0w_1. При изменении сопротивления нагрузки вбли-

зи номинального значения $Z_{2ном}$ изменение вторичного тока незначительно, так как он определяется током I_1.

г) **Влияние конструктивных параметров.** В соответствии с (22.16) погрешность возрастает пропорционально длине магнитопровода l. Поэтому длину l стремятся сократить. Увеличение сечения магнитопровода S уменьшает погрешность, однако ΔI уменьшается медленнее, чем растет сечение. Следует также отметить, что с ростом сечения увеличиваются средняя длина витка обмотки и ее активное сопротивление, что вызывает некоторое увеличение погрешности. Так как при этом повышается масса стали, меди и ТТ в целом, увеличение сечения магнитопровода не всегда рационально.

При прочих равных условиях переход на материал с большей магнитной проницаемостью уменьшает погрешность. Применение изоляционных материалов с улучшенными свойствами (эпоксидных смол, бумажно-масляной изоляции, элегаза) дает возможность уменьшить длину l, а следовательно, и погрешность.

22.3. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ

Для снижения погрешностей применяется их компенсация. Различают компенсацию токовой и угловой погрешностей. Чаще всего необходима компенсация токовой погрешности. Эта компенсация выполняется для диапазона $(0{,}1 \div 1{,}2)\ I_{1ном}$ и применяется в ТТ, используемых для измерений. В ТТ, используемых для релейной защиты, компенсация погрешности применяется реже.

Простейшим методом компенсации токовой погрешности является витковая коррекция. Если $w_2 = w_{2ном} = w_{1ном} k_{ном}$, то погрешность всегда имеет отрицательный знак и определяется уравнением (22.4). Если число витков вторичной обмотки уменьшить (отмотать), то при $w_2 < w_{2ном}$ коэффициент трансформации становится меньше, а вторичный ток $I_2 = I_1 w_1 / w_2$ может быть больше, чем $I_{2ном} = I_{1ном} w_1 / w_{2ном}$. Таким образом, создается положительная погрешность по току, частично компенсирующая отрицательную.

Токовая погрешность с учетом отмотки вторичных витков

$$\Delta I_{\%} = \left[-\frac{I_0 w_1}{F_1} \sin(\alpha + \psi) - \frac{w_2 - w_{2ном}}{w_{2ном}} \right] 100. \qquad (22.17)$$

Второй член в скобках является витковой коррекцией. На рис. 22.4 кривые *1* относятся к трансформатору без компенсации, а кривые *2* — к тому же трансформатору после отмотки вторичных витков.

При отмотке вторичных витков кривая погрешности перемещается

параллельно самой себе в область меньших погрешностей и при большом токе может быть даже положительной. Если вторичная нагрузка мала (0,25 $Z_{2ном}$), то погрешность может даже выйти из допустимых пределов данного класса.

Наибольшую компенсацию необходимо вводить при малых первичных токах. Однако при этом в области номинальных токов при малых нагрузках появляется положительная погрешность, выходящая за пределы класса. Поэтому витковая коррекция не всегда эффективна, что является ее недостатком.

На угловую погрешность отмотка вторичных витков не оказывает влияния. Для уменьшения угловой погрешности на магнитопроводе ТТ устанавливается короткозамкнутый виток. Введение такого витка вызывает увеличение активных потерь в магнитопроводе и реактивного магнитного сопротивления $X_{мст}$ (§ 5.3), и в результате возрастает угол потерь ψ (рис. 22.2). При этом угловая погрешность падает, а погрешность по току увеличивается. Такую компенсацию целесообразно применять, когда по токовой погрешности имеется запас.

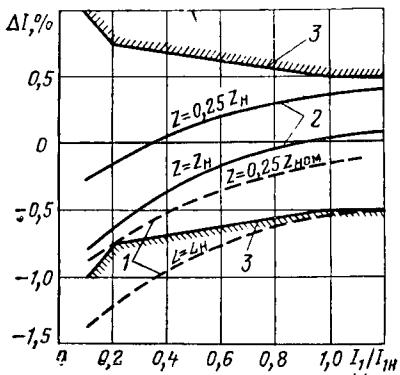


Рис. 22.4. Компенсация погрешности ТТ отмоткой вторичных витков

Существуют и другие методы компенсаций. Широко применяется метод шунта (метод МЭИ) [18,2], заключающийся в повышении магнитной проницаемости путем подмагничивания магнитопровода ТТ полями рассеяния (рис. 22.5). Вторичная обмотка выполнена в виде согласно соединенных катушек *1* и *2* с числом витков w_2' и w_2'' соответственно. Первичная обмотка *3*, имеющая w_1 витков, расположена на правом стержне. Внутри магнитопровода располагается магнитный шунт *4*.

Если пренебречь намагничивающим током, то можно написать

$$\underline{I}w_1 - \underline{I}_2 w_2' - \underline{I}_2 w_2'' = 0. \qquad (22.18)$$

Распределение вторичной обмотки по двум стержням и установка шунта *4* создают увеличенные потоки рассеяния. На левом стержне при прохождении тока I_2 создается МДС $I_2 w_2'$. Эта МДС создает поток рассеяния Φ_{s2}, который замыкается через шунт. На правом стержне действует МДС, равная $\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2''$. Под действием этой МДС возника-

ет поток рассеяния Φ_{s1}, который также проходит через шунт *4*. Выбрав соответствующим образом магнитное сопротивление шунта, можно даже при малых первичных токах перевести рабочую точку в область с высоким μ_a и понизить магнитное сопротивление магнитопровода. В результате МДС, необходимая для проведения потока Φ_0, резко падает, что ведет к уменьшению как токовой, так и угловой погрешностей ТТ. При токах, близких к номинальному и превышающих его, происходит насыщение шунта и компенсация перестает действовать.

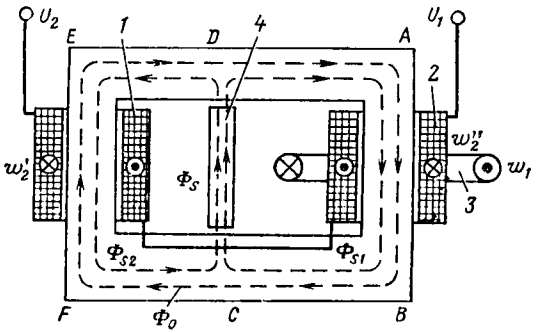


Рис. 22.5. Трансформатор тока с компенсацией погрешности увеличением потоков рассеяния

Наряду с повышением магнитной проницаемости магнитопровода положительную роль в снижении погрешности играет также уменьшение индуктивного сопротивления вторичной обмотки x_2 в результате так называемого двойного рассеяния [22.1].

Применение высококачественных магнитных материалов типа стали марки 3413, пермаллоя и др. с высокой магнитной проницаемостью и малыми активными потерями позволяет создавать малогабаритные ТТ с малой погрешностью и без применения компенсации.

22.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

а) **Работа ТТ при КЗ в контролируемой сети.** Трансформаторы тока являются одним из основных звеньев релейной защиты. Поэтому они должны быть термически и динамически стойкими и обладать погрешностью, обеспечивающей нормальную работу релейной защиты. При больших кратностях первичного тока магнитопровод ТТ насыщается и погрешность резко растет.

Практика показала, что если полная погрешность до-

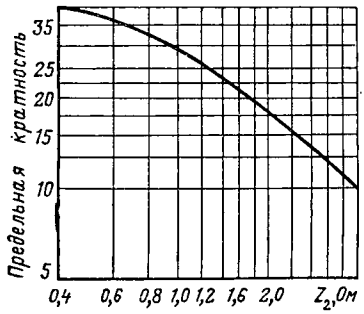


Рис. 22.6. Зависимость номинальной предельной кратности от сопротивления нагрузки

стигла 10 %, то при дальнейшем возрастании первичного тока она столь быстро увеличивается, что нормальная работа релейной защиты невозможна. Поэтому номинальная предельная кратность ТТ должна быть выше отношения тока КЗ к номинальному. Типичная зависимость номинальной предельной кратности от сопротивления нагрузки показана на рис. 22.6. Уменьшая сопротивление нагрузки, можно увеличивать и номинальную предельную кратность.

Трансформаторы, предназначенные для дифференциальной защиты, выбираются с одинаковой номинальной предельной кратностью. При этом ток небаланса защиты, равный разности вторичных токов трансформаторов (при одинаковом первичном токе), получается небольшим.

При КЗ вследствие насыщения магнитопровода кривая вторичного тока резко отличается от синусоиды. Приближенно максимальную кратность вторичного тока можно найти по формуле

$$n_{max} = \frac{B_s}{B_{тном}} + (2 \div 3),$$

где B_s — индукция насыщения (для электротехнической стали $B_s \cong 2$ Тл); $B_{тном}$ — амплитуда индукции при номинальном первичном токе.

Трансформаторы с многовитковой первичной обмоткой при КЗ в контролируемой сети подвергаются повышенной электрической нагрузке. Индуктивное сопротивление такой обмотки соизмеримо с сопротивлением остальной короткозамкнутой цепи. При этом на обмотку может ложиться существенная часть напряжения сети, вследствие чего возможен пробой междувитковой изоляции.

б) **Работа ТТ при наличии в токе КЗ апериодической составляющей.** До сих пор рассматривался установившийся режим, когда в первичной обмотке ТТ протекает синусоидальный ток неизменной амплитуды. В действительности начало КЗ характеризуется переходным процессом при наличии апериодической составляющей тока (§ 1.8). Наиболее тяжелый случай для ТТ возникает, когда начальное значение апериодической составляющей равно амплитуде переменной составляющей (полная апериодическая составляющая):

$$i_1 = -I_{1\text{пер}m}\cos\omega t + I_{1\text{пер}m}e^{-t/T_1},$$

где $I_{1\text{пер}m}$ — амплитуда периодической составляющей тока; T_1 — постоянная времени цепи КЗ.

Примем, что магнитопровод ненасыщен, его магнитная проницаемость μ_a постоянна и индуктивность цепи намагничивания $L_0 = \text{const}$. Для упрощения положим, что нагрузка чисто активная ($Z_\text{н} = R_\text{н}$) и сопротивление обмотки $x_2 = 0$. Для схемы замещения рис. 22.1, *г* можно написать

$$L_0'\frac{di_0'}{dt} = i_2(r_2 + R_\text{н}); \quad i_2 = i_1' - i_0';$$

$$i_1' = i_1 w_1/w_2; \quad i_0' = i_0 w_1/w_2;$$

$$i_1' = -I_{1\text{пер}m}'\cos\omega t + I_{1\text{пер}m}'e^{-t/T_1},$$

где L_0' — индуктивность цепи намагничивания, приведенная ко вторичной обмотке; i_0' и i_1' — намагничивающий и первичный токи, приведенные ко вторичной обмотке; i_2 — вторичный ток; r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки; $R_\text{н}$ — сопротивление нагрузки; $I_{1\text{пер}m}'$ — амплитуда переменной составляющей первичного тока, приведенная ко вторичной обмотке.

Решение этой системы дает мгновенные значения токов i_0 и i_2 [22.2]. Введем постоянную времени цепи намагничивания $T' = L_0'/(R_\text{н} + r_2)$.

Если $\omega(T')^2 \gg 1$ и $\omega T' \gg 1/(\omega T_1)$ (что часто имеет место), то намагничивающий ток

$$i_0' = I_{1\text{пер}m}'\left[\frac{T_1}{T' - T_1}\left(e^{-t/T'} - e^{-t/T_1}\right) - \frac{1}{\omega T'}\sin\omega t\right].$$

Намагничивающий ток состоит из периодической составляющей

$$i_{0\text{пер}}' = -\frac{I_{1\text{пер}m}'}{\omega T'}\sin\omega t$$

и апериодической составляющей

$$i'_{0\text{апер}} = I'_{1\text{пер}m}\frac{T_1}{T'-T_1}\left(e^{-t/T'}-e^{-t/T_1}\right).$$

Под воздействием этих составляющих создаются индукции

$$B_{\text{пер}} = \frac{i'_{0\text{пер}}}{l}w_2\mu_a \text{ и } B_{\text{апер}} = \frac{i'_{1\text{апер}}}{l}w_2\mu_a,$$

где l — средняя длина магнитопровода.

На рис. 22.7, *а* показано изменение во времени апериодических составляющих первичного тока $i'_{1\text{апер}}$, вторичного тока $i_{2\text{апер}}$ и намагничивающего тока $i'_{0\text{апер}}$. В момент $t_0 = \frac{T'T_1}{T'-T_1}\ln\frac{T'}{T_1}$, когда составляющая $i'_{0\text{апер}}$ проходит через максимум, апериодическая составляющая вторичного тока $i_{2\text{апер}}$ проходит через нуль [22.2]. Из-за наличия апериодической составляющей $i'_{0\text{апер}}$ кривая $i_{2\text{апер}}$ идет ниже кривой $i'_{1\text{апер}}$. При этом кривая периодической составляющей вторичного тока также опускается и возникает угловая погрешность δ (рис. 22.7, *б*). За угловую погрешность в переходном режиме принимается фазовый сдвиг в градусах (или миллисекундах) между моментами t_2 и t_1 прохождения через нуль вторичного и первичного токов. В переходном режиме угловая (фазовая) погрешность будет различной при каждом прохождении тока через нуль из-за наличия меняющейся во времени составляющей намагничивающего тока $i'_{0\text{апер}}$. На рис. 22.8 показано изменение полного намагничивающего тока $i'_0 = i'_{0\text{пер}} + i'_{0\text{апер}}$. При $T_1 \geqslant 0{,}05$ с и $T' \gg T_1$, что встречается на практике довольно часто, амплитуда апериодической составляющей тока намагничивания в несколько десятков раз больше амплитуды периодической составляющей, причем $B_{\text{апер}m} \gg B_{\text{пер}m}$ и магнитопровод насыщается под действием индукции $B_{\text{апер}}$ даже при небольшой кратности первичного тока. При этом возникают большие погрешности по току и углу, осложняющие работу релейной защиты. Для снижения погрешностей ТТ выполняются с немагнитным зазором, наличие которого предотвращает насыщение магнитопровода под воздействием апериодической составляющей индукции [22.2].

Исследованиями МЭИ установлена возможность созда-

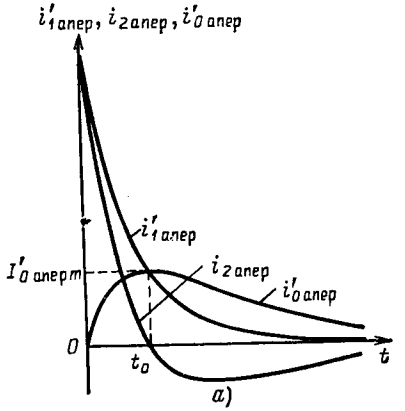
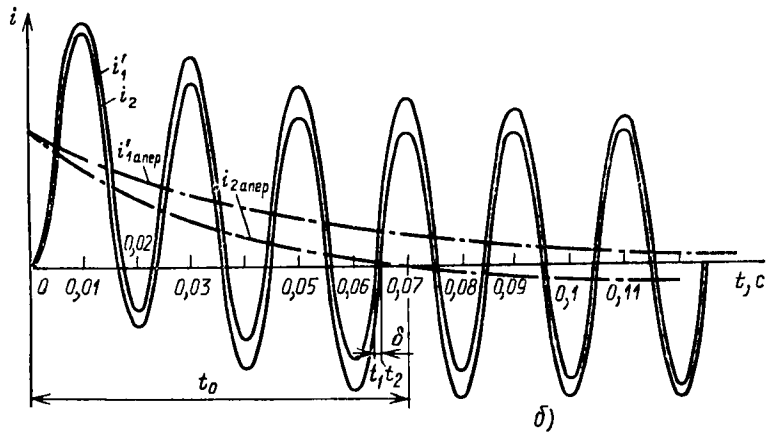


Рис. 22.7. Изменение токов ТТ в переходном режиме:

а — кривые апериодической составляющей первичного, вторичного тока и апериодической составляющей намагничивающего тока; *б* — образование фазовой (угловой) погрешности



ния ТТ для измерения больших переменных токов (100—120 кА) в переходных режимах [22.3—22.7]. Ниже приводятся некоторые результаты этих исследований.

1. ТТ с тороидальным магнитопроводом и большим числом вторичных витков может иметь большое отрицательное значение индуктивного сопротивления x_2 даже при равномерном распределении витков вторичной обмотки на магнитопроводе. Хотя это сопротивление является чисто расчетным параметром, его наличие ухудшает работу ТТ, так как в магнитопроводе увеличивается индукция.

2. Сопротивление $x_2=\omega L_{2т}$ можно уменьшить увеличе-

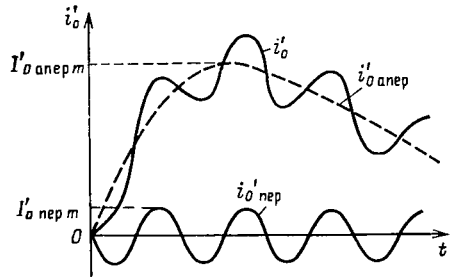
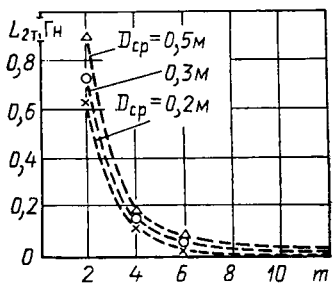


Рис. 22.8. Кривая суммарного намагничивающего тока

нием числа немагнитных зазоров m (рис. 22.9) и увеличением внутреннего радиуса тороидального магнитопровода r_1 (рис. 22.10) при сохранении его сечения.



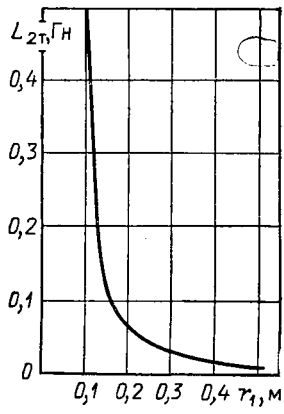


Рис. 22.9. Зависимость индуктивности рассеяния вторичной обмотки $L_{2т}=x_2/\omega$ от числа немагнитных зазоров и среднего диаметра $D_{ср}$

Рис. 22.10. Зависимость индуктивности $L_{2т}=x_2/\omega$ от внутреннего радиуса магнитопровода

3. При больших первичных токах ТТ подвержены влиянию внешнего магнитного поля, создаваемого током в контуре первичной обмотки. Под воздействием этого поля уменьшается магнитная проницаемость магнитопровода и происходит его насыщение. Индукция, создаваемая внешним магнитным полем в магнитопроводе, может значительно превышать индукцию, создаваемую намагничивающим

током i_0' . Для снижения влияния внешнего магнитного поля ферромагнитные экраны более эффективны, чем проводящие (немагнитные). Однако их применение приводит к существенному увеличению массы и габаритов ТТ. Проведенные в МЭИ исследования позволили разработать методики: расчета и конструирования ТТ на требуемые параметры [22.7, 22.8, 22.9, 22.11], расчета влияния внешнего магнитного поля на работу ТТ [22.12] и определения токовой погрешности в переходном режиме [22.15].

На рис. 22.11 приведены осциллограммы, снятые для разработанного в МЭИ ТТ при первичном токе 116,2 кА и полной апериодической составляющей тока КЗ с постоян-

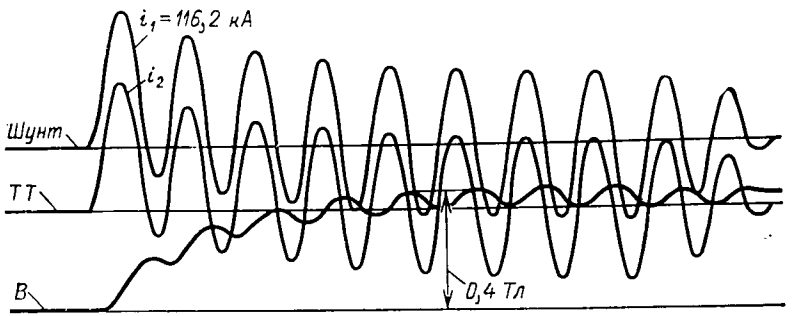


Рис. 22.11. Осциллограммы работы ТТ при первичном токе 116,2 кА

ной времени $T_1=0{,}05$ с. Наибольшая мгновенная погрешность по току, равная $i_0'/I_{1\text{перт}}$, не превышает 0,64 %, а индукция в магнитопроводе 0,4 Тл.

На рис. 22.12 представлена осциллограмма работы ТТ в режиме АПВ при токе 128 кА с полной апериодической составляющей с постоянной времени $T_1=0{,}1$ с и бестоковой паузой $t_{бт}=0{,}2$ с [22.17]. Эталонным измерительным прибором являлся воздушный трансформатор тока (ВТТ). Наибольшая токовая погрешность в конце первого цикла включение-отключение не превышает 1, в конце второго 2 %. Индукция в магнитопроводе не превышала 1,4 Тл.

Внешний вид одного из экспериментальных образцов ТТ для работы в переходном режиме показан на рис. 22.13. На этом рисунке: *1* — первичная обмотка; *2* — тороидальный магнитопровод со вторичной обмоткой; *3* — активный шунт, включенный на выводы вторичной обмотки; *4* —

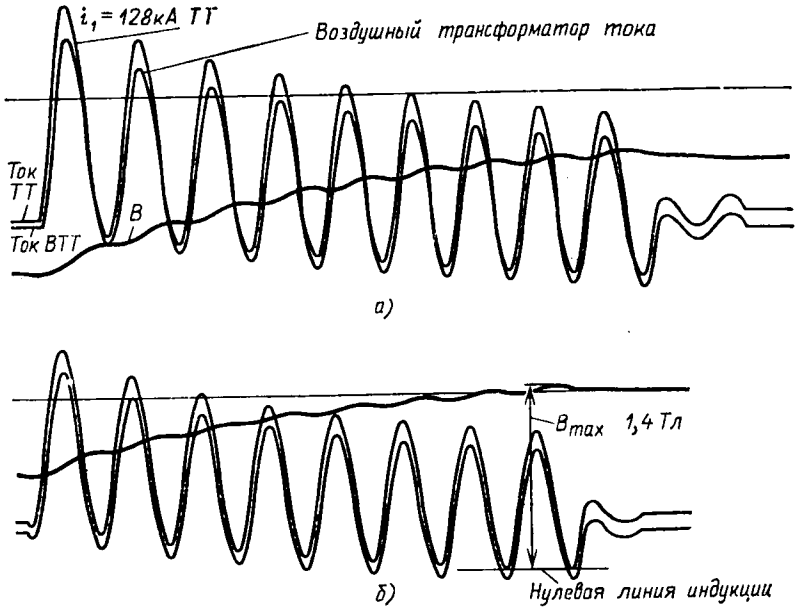


Рис. 22.12. Осциллограмма работы ТТ в цикле АПВ:
а — первое включение; *б* — второе включение

разрядник, подключенный параллельно выводам вторичной обмотки для защиты ее от перенапряжений при размыкании. Первичный номинальный ток ТТ, показанного на рис. 22.13, составляет $I_{1ном}=5$ кА; вторичный номинальный ток — $I_{2ном}=1$ А; предельный первичный ток 120 кА (действующее значение); постоянная времени первичной цепи $T_1=0{,}1$ с, сопротивление нагрузки 1 Ом.

в) **Работа ТТ при разомкнутой вторичной обмотке.** При эксплуатации ТТ возможны случаи, когда вторичная обмотка оказывается разомкнутой. В нормальном режиме МДС I_0w_1 составляет проценты или даже доли процента МДС F_1. Амплитуда магнитной индукции составляет 0,06—0,1 Тл.

При размыкании вторичной обмотки $F_2=0$ и размагничивающее действие вторичной МДС прекращается. Ток в первичной цепи остается неизменным, и первичная МДС целиком идет на намагничивание магнитопровода. Это приводит к его насыщению и появлению высокой ЭДС на разомкнутой вторичной обмотке.

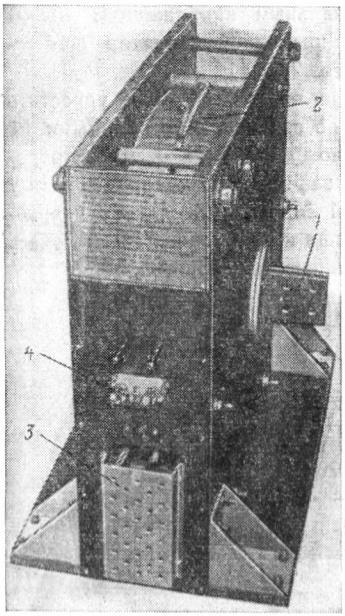


Рис. 22.13. ТТ для работы в переходном режиме

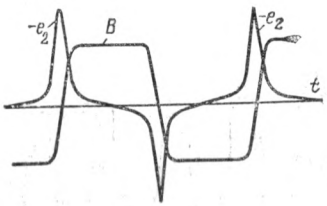


Рис. 22.14. Изменение индукции B и вторичной ЭДС e_2 во времени при разомкнутой вторичной обмотке

Примерные кривые изменения индукции B и вторичной ЭДС e_2 показаны на рис. 22.14. Чем больше первичная номинальная МДС $I_{1\text{ном}}w_1$, тем больше амплитудное значение e_2, которое может достигать десятка киловольт. Такое напряжение опасно для изоляции трансформатора и обслуживающего персонала.

При насыщении магнитопровода в нем резко возрастают активные потери, за счет которых температура изоляции может существенно превысить допустимые значения.

Режим разомкнутой вторичной обмотки является для трансформатора тока аварийным, что необходимо предусматривать при проектировании цепей релейной защиты. Обычно вторичная обмотка выводится на дополнительные контакты K с перемычкой (см. рис. 22.1, *а*). Перед отключением от вторичной обмотки измерительного прибора она вначале шунтируется этой перемычкой.

22.5. КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Различают одновитковые и многовитковые трансформаторы тока. В одновитковом ТТ первичная обмотка может быть выполнена в виде стержня, шины или пакета шин. Примером такого исполнения является

трансформатор типа ТПОЛ-10 с номинальным напряжением 10 кВ (рис. 22.15), который используется как проходной изолятор при переходе линии из одного помещения в другое.

Применение литой эпоксидной изоляции позволяет сильно упростить конструкцию и технологию производства по сравнению со сборными ТТ с фарфоровой изоляцией. Первичная обмотка-стержень *4*, магнитопроводы *1* и крепежное кольцо *3* устанавливаются в специальную форму и заливаются жидкой смесью эпоксидной смолы, пылевидного кварцевого песка и отвердителя. После затвердения и полимеризации эта смесь приобретает высокие электрические и механические свойства.

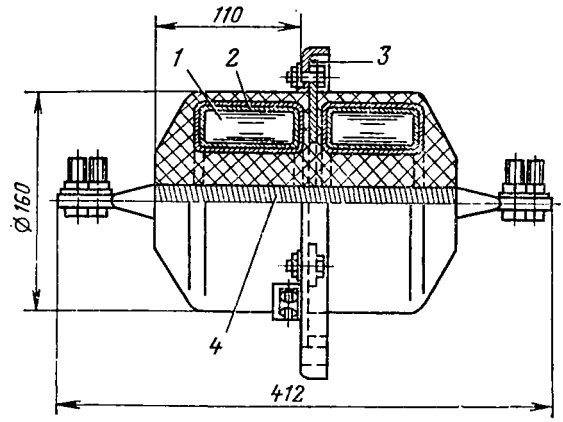


Рис. 22.15. Одновитковый ТТ типа ТПОЛ-10

По сути дела ТТ по рис. 22.15 имеет два независимых трансформатора, параметры которых могут быть различными. Магнитопроводы трансформатора выполняются в виде двух тороидальных сердечников *1*, навитых лентой из текстурованного материала, например марки 3413.

Если вторичная обмотка *2* равномерно распределена на тороидальном магнитопроводе, то ее индуктивное сопротивление x_2 в схеме замещения равно нулю, что позволяет снизить погрешность измерения ТТ. Конструкция допускает установку нескольких ТТ с разными параметрами на одной стержневой первичной обмотке.

Электродинамическая стойкость одновитковых ТТ достаточно высока, так как на первичную обмотку действуют силы только от подводящих шин и соседних фаз. При трехфазном КЗ между стержнями первичных обмоток соседних фаз возникает электродинамическая сила. Кроме того, на конец стержня передаются силы, действующие на подводящую шину, которая одним своим концом укреплена на ближайшем опорном изоляторе, вторым — на стержне ТТ.

Электродинамическая стойкость, гарантированная заводом-изготовителем, относится обычно к определенному расстоянию между фазами и определенной длине шины, соединяющей опорный изолятор с ТТ [3.1]. Недостаток одновитковых ТТ заключается в большой погрешности при малом номинальном первичном токе, поскольку $w_1=1$. Поэтому одновитковые ТТ применяются при токах 400 А и более. При первичном токе более 2 кА применяются одновитковые шинные трансформаторы тока. В качестве первичной обмотки используется пакет шин распределительного устройства, который проходит через окно магнитопровода. Электродинамическая стойкость такого ТТ определяется механической прочностью шин, их креплением и заводом не нормируется.

Одновитковые ТТ могут быть встроенными. В этом случае используются токоведущий стержень и изолятор другого аппарата или оборудования (выключателя, силового трансформатора, проходного изолятора и др.). Расположение четырех таких трансформаторов в выключателе показано на рис. 18.2. Применение встроенных ТТ дает большой экономический эффект.

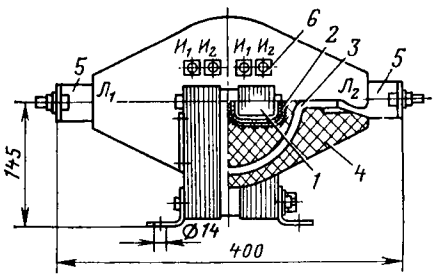


Рис. 22.16. Многовитковый ТТ

На проходном изоляторе встроенных ТТ, как правило, устанавливается несколько ТТ, вторичные обмотки которых можно соединять последовательно или параллельно. При последовательном соединении вторичных обмоток коэффициент трансформации не изменяется, так как удваивается число первичных и вторичных витков. Вторичный ток сохраняется неизменным, а вторичная ЭДС удваивается, что позволяет увеличить в 2 раза вторичную мощность. Для встроенных ТТ это очень важно, так как они удалены от реле и измерительных приборов, благодаря чему сопротивление соединяющих проводов получается большим. При параллельном соединении вторичных обмоток коэффициент трансформации уменьшается, так как первичные обмотки включаются последовательно. При этом вторичный ток двух ТТ увеличивается. Это дает возможность получить вторичный ток, приближающийся к стандартному значению 5 А, например при первичном токе $I_{1ном}=200$ А.

Вторичные обмотки имеют отводы, которые позволяют в небольшом диапазоне регулировать коэффициент трансформации.

При малых первичных токах (ниже 400 А) для получения высокого класса точности применяются многовитковые ТТ. При любом значении первичного тока необходимая для данного класса точности первичная

МДС F_1 получается за счет увеличения числа витков первичной обмотки w_1. На рис. 22.16 показан многовитковый трансформатор на напряжение 10 кВ. На прямоугольном шихтованном магнитопроводе *1* расположена вторичная обмотка *2*. Первичная обмотка *3* выполняется из медной шины. Первичная обмотка выведена на контакты *5*, вторичная — на контакты *6*. Все детали ТТ залиты эпоксидным компаундом *4*.

При КЗ на витки первичной обмотки действуют разрывающие электродинамические силы, что снижает стойкость ТТ Кроме того, на первичной обмотке из-за ее относительно большой индуктивности может появиться значительное падение напряжения. Это является недостатком данной конструкции ТТ.

При напряжении 35 кВ и выше для открытых установок применяются ТТ с масляной изоляцией. Наиболее распространены ТТ так называемого звеньевого типа (рис. 22.17). Три тороидальных магнитопровода *1* со вторичными обмотками *2* охвачены первичной обмоткой *4*, выполняемой мягким многожильным проводом и обычно имеет несколько параллельных ветвей (на рис. 22.17 две ветви). При переходе с параллельного соединения на последовательное первичный номинальный ток трансформатора уменьшается в 2 раза.

Первичная и вторичная обмотки изолируются кабельной бумагой

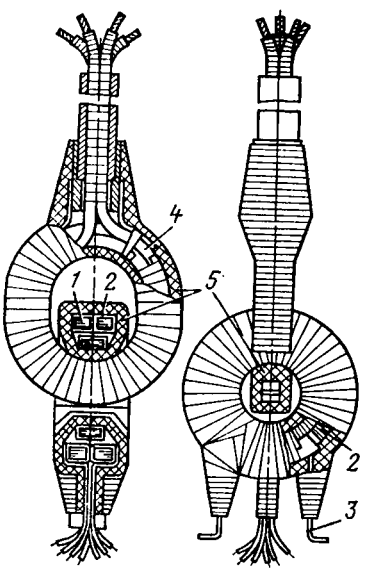


Рис. 22.17. ТТ звеньевого типа

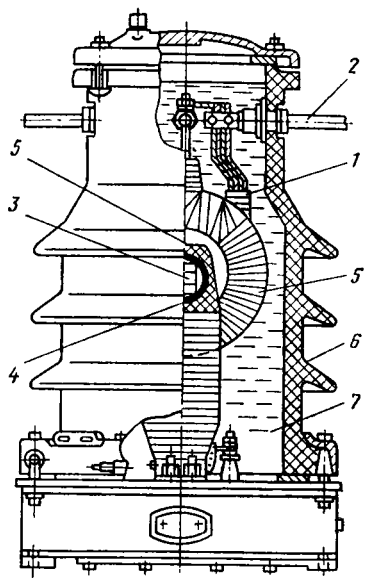
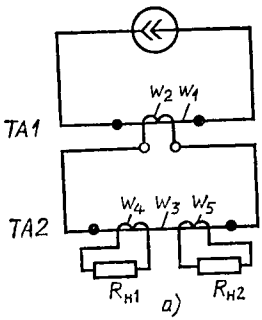


Рис. 22.18. Трансформатор тока типа ТФН-35



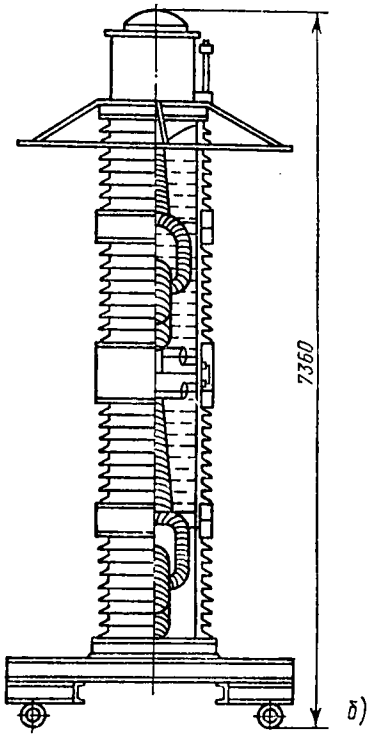


Рис. 22.19. Двухступенчатый каскадный ТТ:

а — принципиальная схема; *б* — общая компоновка

5 толщиной 0,12 мм. После наложения изоляции магнитопровод с обмотками крепится к основанию ТТ с помощью лап *3*. К этому же основанию крепится фарфоровый кожух, который защищает обмотки от воздействия окружающей среды. Внутренняя полость ТТ после вакуумной сушки заполняется трансформаторным маслом. Масло пропитывает кабельную бумагу и заполняет все пустоты. Такие ТТ выполняются на напряжение до 220 кВ. Общий вид ТТ типа ТФН-35 на напряжение $U_{ном}$=35 кВ представлен на рис. 22.18. Здесь *1* — вывод ветвей первичной обмотки; *2* — вывод первичной обмотки; *3* — магнитопровод; *4* — вторичная обмотка; *5* — изоляция из кабельной бумаги; *6* — фарфоровая покрышка; *7* — трансформаторное масло.

С ростом номинального напряжения стоимость ТТ возрастает примерно пропорционально квадрату напряжения, в основном за счет изоляции. Поэтому при напряжении $U_{ном}$>220 кВ применяют каскадные ТТ. На рис. 22.19, *б* показан двухступенчатый каскадный ТТ на напряжение 500 кВ. Схема включения обмоток дана на рис. 22.19, *а*. Здесь

w_1 — первичная обмотка верхней ступени; w_2 — вторичная обмотка верхней ступени; w_3 — первичная обмотка нижней ступени; w_4, w_5 — вторичные обмотки нижней ступени; $R_н$ — нагрузка ТТ. Общая компоновка показана на рис. 22.19, *б*. Каждая ступень представляет собой ТТ на напряжение $250/\sqrt{3}$ кВ, аналогичный показанному на рис. 22.17. Вторичная обмотка первой ступени питает первичную обмотку второй ступени. При перевозке каждая ступень, залитая маслом, доставляется к месту установки отдельно. Стоимость двухступенчатого трансформатора примерно в 2 раза меньше, чем одноступенчатого. Недостатком каскадного ТТ является увеличение погрешности из-за увеличения сопротивления обмоток.

В связи с повышением номинального напряжения до 1150 кВ и выше представляется целесообразным переход на ТТ с оптико-электронной системой. Датчик тока может находиться под высоким потенциалом и модулировать световой поток, подаваемый с земли по волоконному световоду (внешняя модуляция). В другом варианте датчик тока сам вырабатывает модулированный световой поток, который по световоду передается на потенциал земли (внутренняя модуляция) [18.2]. Однако вследствие сложности такие системы пока широкого применения не получили.

22.6. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Номинальное напряжение ТТ должно быть не меньше номинального напряжения сети, в которой он устанавливается. Обычно изоляция ТТ находится под воздействием фазного напряжения. Однако в энергосистемах с изолированной нейтралью при заземлении одной фазы ТТ оказывается под линейным напряжением. Наибольший возможный ток продолжительного режима работы установки высокого напряжения должен быть возможно ближе к номинальному первичному току ТТ для получения наименьшей погрешности. ТТ с вторичным током 1 А желательно применять при удаленном расположении ТТ от аппаратов релейной защиты, так как в этом случае можно допустить большее сопротивление проводников, соединяющих его с нагрузкой. Класс точности ТТ выбирается в соответствии с его назначением. ТТ с меньшей погрешностью (классы 0,5 и 1) используются для измерений. Для релейной защиты выбираются ТТ, имеющие необходимую номинальную предельную кратность.

После выбора ТТ по указанным параметрам проводится проверка его динамической и термической стойкости. Для этого необходимо знать ударный ток в месте установки ТТ

и действующее значение установившегося тока КЗ. Эти величины должны быть меньше токов динамической и термической стойкости выбранного ТТ.

ТТ на малые номинальные токи хотя и имеют достаточную кратность по динамической и термической стойкости, но в абсолютных величинах эта стойкость может быть недостаточной. Поэтому часто приходится выбирать ТТ на номинальный ток, превышающий ток контролируемой установки. При этом, как правило, увеличивается погрешность, так как номинальный ток установки получается меньше номинального тока ТТ.

Для ТТ цепей релейной защиты необходимо, чтобы номинальная предельная кратность была выше отношения тока КЗ к номинальному. ТТ дифференциальной защиты должны иметь одинаковую номинальную предельную кратность.

При выборе ТТ необходимо учитывать, что его реальной нагрузкой являются не только обмотки измерительных приборов и реле, но и сопротивления соединительных проводов.

Глава двадцать третья

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

23.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

а) **Назначение и основные параметры.** Трансформаторы напряжения (ТН) служат для преобразования высокого напряжения в низкое стандартное напряжение, удобное для измерения. Обычно за номинальное вторичное напряжение принимается напряжение 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. Это позволяет для измерения любого высокого напряжения применять одни и те же измерительные приборы. Реле защиты также выпускаются на те же стандартные напряжения независимо от номинального напряжения защищаемой установки.

Первичная обмотка ТН изолируется от вторичной соответственно классу напряжения установки. Для безопасности обслуживания один вывод вторичной обмотки заземляется. Таким образом, ТН изолирует измерительные приборы и реле от цепи высокого напряжения и делает безопасным их обслуживание.

Схема включения однофазного ТН дана на рис. 23.1. Первичная обмотка w_1 присоединена к цепи высокого напряжения через предохранители *FU1*, *FU2*. Вторичная обмотка w_2 питает нагрузку в виде обмоток измерительных приборов или реле защиты через предохранители *FU3*, *FU4*. В нормальной конструкции заземляются и вторичная обмотка w_2, и магнитопровод.

Предохранители *FU3*, *FU4* служат для защиты ТН от КЗ в цепи нагрузки.

Предохранители *FU1*, *FU2* на высоковольтной стороне служат для защиты сети от КЗ в ТН. Целесообразно применение токоограничивающих предохранителей типа ПКТ или стреляющих с ограничивающим резистором. Вследствие высокого сопротивления обмоток самого ТН при КЗ во вторичной цепи ток в первичной цепи мал (порядка нескольких ампер) и недостаточен для срабатывания предохранителей *FU1*, *FU2*. Этим объясняется установка предохранителей *FU3*, *FU4* во вторичной цепи.

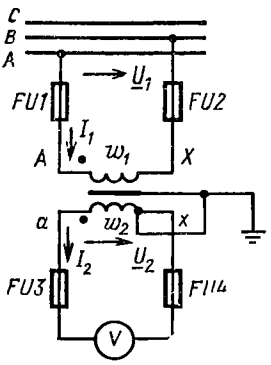


Рис. 23.1. Схема включения однофазного ТН

Основными параметрами ТН являются:

номинальное напряжение первичной и вторичной обмоток, указанное на щитке. Номинальное напряжение ТН равно номинальному напряжению первичной обмотки;

номинальный коэффициент трансформации — отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному:

$$k_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}};$$

погрешность по напряжению, %, определяется уравнением

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_2 k_{\text{ном}} - U_1}{U_1} 100, \qquad (23.1)$$

где U_1 — напряжение, поданное на первичную обмотку; U_2 — напряжение, измеренное на выводах вторичной обмотки.

При $U_1/U_2 = k_{\text{ном}}$ погрешность $\Delta U_{\%} = 0$.

По ГОСТ 1983-77 направления токов и напряжений, показанные на рис. 23.1, приняты за положительные. При отсутствии угловой погрешности векторы $\underline{U}_1$ и $\underline{U}'_2$ совпадают по фазе. Если вектор $\underline{U}'_2$ опережает вектор $\underline{U}_1$., угловая погрешность считается положительной. Угловую погрешность необходимо учитывать при измерении активной мощности, энергии и в схемах релейной защиты. Допустимая погрешность ТН по напряжению в процентах при номинальных условиях численно равна классу точности.

Погрешности ТН не должны превышать значений, предусмотренных классом точности при колебании напряжения U_1 в пределах 90—110 % $U_{1\text{ном}}$ и колебаний мощности вторичной цепи в пределах 25 — 100 % номинальной.

Номинальная вторичная нагрузка. ТН включаются (рис. 23.1) так же, как силовые трансформаторы. Ток вторичной обмотки определяется сопротивлением нагрузки:

$$I_2 = U_2/Z_2,$$

а вторичная мощность

$$P_2 = U_2 I_2 = U_2^2/Z_2.$$

При уменьшении сопротивления Z_2 вторичная мощность увеличивается. Вторичная нагрузка Z_2 кроме модуля характеризуется также коэффициентом мощности $\cos\varphi_{2\text{ном}}$.

Номинальная мощность ТН представляет собой наибольшее значение вторичной мощности при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, при которой погрешность ТН не выходит за пределы, определенные классом точности. Требования к ТН определяются ГОСТ 1983-77.

б) **Погрешности ТН.** Погрешность ТН обусловлена наличием активных и реактивных сопротивлений обмоток и тока холостого хода. Схема замещения ТН дана на рис. 23.2, а векторная диаграмма — на рис. 23.3. Все величины приведены к первичной обмотке. Поток Ф создает вторичную ЭДС E'_2, отстающую от него на 90°. Под действием этой ЭДС во вторичной цепи возникают напряжение U'_2 и ток $\underline{I}_2$, проходящий по сопротивлению нагрузки R'_2, X'_2. Тот же ток создает падения напряжения на сопротивлениях вторичной обмотки r'_2 и x'_2. При выбранных положительных направлениях ток — I'_2 отстает от ЭДС $\underline{E}'_2$ (§ 22.1).

Сумма этих напряжений равна ЭДС E'_2. Намагничива-

ющий ток I_0 (ток холостого хода) на угол потерь ψ опережает поток Ф. В первичной обмотке создается падение напряжения $I_1(r_1+jx_1)$. Но

$$\underline{I}_0 w_1 = \underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2.$$

и

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_2. \qquad (23.2)$$

Тогда

$$\underline{I}_1(r_1 + jx_1) = \underline{I}_0(r_1 + jx_1) + \underline{I}'_2(r_1 + jx_1).$$

Согласно рис. 23.2 можно написать

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1(r_1 + jx_1) + \underline{I}'_2(r'_2 + jx'_2) + \underline{U}'_2.$$

Используя (23.2), получаем

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_0(r_1 + jx_1) + \underline{I}'_2(r_1 + r'_2) + \underline{I}'_2 j(x_1 + x'_2) + \underline{U}'_2.$$

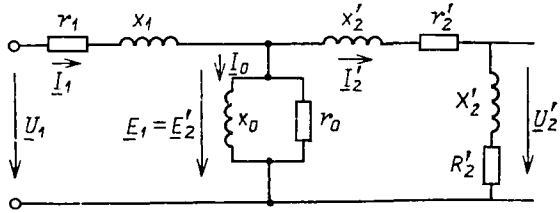


Рис. 23.2. Схема замещения ТН

Катеты треугольника ABC пропорциональны падениям напряжения от тока холостого хода $\underline{I}_0$, катеты треугольника CDE — падениям напряжения от тока нагрузки $\underline{I}'_2$. При отсутствии погрешности $U'_2 = U_2 \frac{w_1}{w_2} = U_1$ или $U_1/U_2 = w_1/w_2$ и точки A, E должны совпасть.

Погрешность ТН по напряжению

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_2 k_{\text{ном}} - U_1}{U_1} 100\,\% = -\frac{U_1 - U_2 k_{\text{ном}}}{U_1} 100\,\% =$$

$$= -\frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100\ \%.$$

Поскольку угол между $\underline{U}_1$ и $\underline{U}'_2$ мал, то вместо арифметической разности модулей этих векторов можно взять проекцию вектора AE на ось $\underline{U}'_2$. Таким образом, погрешность определяется отрезком AF.

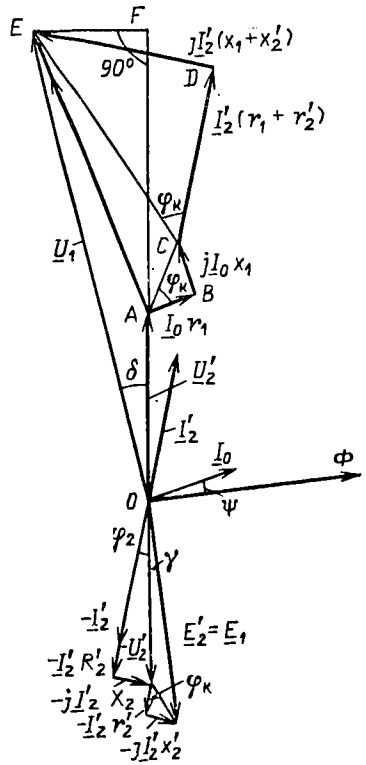


Рис. 23.3. Векторная диаграмма ТН

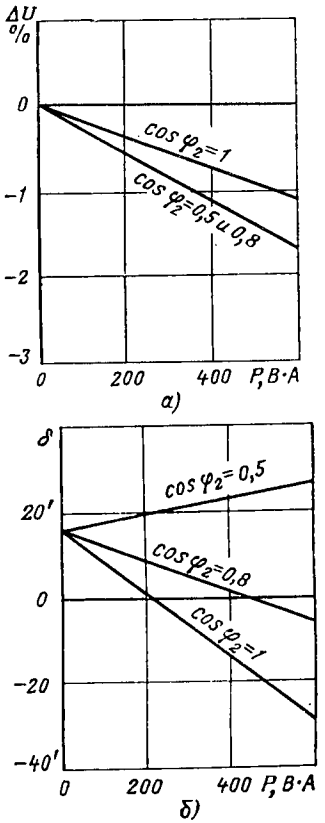


Рис. 23.4. Зависимость погрешности от вторичной мощности

В реальных ТН углы $\varphi_{к1}$ и $\varphi_{к2}$, определяемые активным и реактивным сопротивлением обмоток, примерно одинаковы. В связи с этим введем угол $\varphi_к = \varphi_{к1} = \varphi_{к2}$, необходимый для построения треугольника падений напряжений CDE.

Угол γ между напряжением на нагрузке $-\underline{U}_2'$ и ЭДС $\underline{E}_2'$ составляет несколько минут, и им можно пренебречь. Найдем проекции векторов $\underline{I}_0 r_1$, $\underline{I}_0 x_1$, $\underline{I}_2'$ $(r_1 + r_2')$, $\underline{I}_2'$ $(x_1 + x_2')$ на направление вектора $\underline{U}_2'$ (ось OF). Уравнение для погрешности по напряжению имеет вид

$$\Delta U_{\%} = -\frac{AF}{OE}\,100\% = -$$

$$-\frac{I_0(r_1 \sin\psi + x_1 \cos\psi) + I_2'\left[(r_1 + r_2')\cos\varphi_2 + (x_1 + x_2')\sin\varphi_2\right]}{U_1}\,100\%. \tag{23.3}$$

Уравнение (23.3) показывает, что погрешность состоит из двух частей. Первая определяется током холостого хода, вторая — током нагрузки. Для того чтобы уменьшить погрешность по напряжению, снижают активное и реактивное сопротивление обмоток. Уменьшение активного сопротивления достигается малой плотностью токов в обмотках (около 0,3 А/мм^2), что облегчает тепловой режим ТН.

Для снижения индуктивного сопротивления обмоток x_1 и x_2' уменьшают расстояние между первичной и вторичной обмотками [18.2].

При заданном первичном напряжении U_1 намагничивающий ток I_0 практически постоянен. В этом случае согласно (23.3) погрешность линейно растет с увеличением тока нагрузки I_2'. Поскольку в номинальном режиме напряжение U_2' мало меняется с током нагрузки I_2', то вторичная (выходная) мощность P_2 пропорциональна этому току. Зависимость погрешности по напряжению от вторичной мощности для одного из исполнений ТН показана на рис. 23.4, *а*.

На погрешность влияет коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2$. С уменьшением $\cos\varphi_2$ погрешность увеличивается.

Погрешность зависит и от первичного напряжения.

Рассмотрим холостой ход ($I_2' = 0$). Если принять, что при изменении I_0 угол потерь не изменяется, то согласно (23.3) погрешность по напряжению будет определяться отношением намагничивающего тока I_0 к первичному напряжению U_1. Индукция B пропорциональна первичному напряжению, а намагничивающий ток пропорционален напряженности поля:

$$I_0 = Hl/w_1.$$

Тогда погрешность пропорциональна отношению H/B_m или обратно пропорциональна магнитной проницаемости μ_a. Обычно рабочая индукция в номинальном режиме составляет 1,1 Тл.

При изменении первичного напряжения в пределах $(0.5 \div 1{,}1)\,U_{1\text{ном}}$ магнитная проницаемость увеличивается и погрешность уменьшается.

Следует отметить, что погрешность от тока холостого хода мала по сравнению с погрешностью от тока нагрузки. Поэтому изменение первичного напряжения в указанных пределах мало влияет на значение погрешности.

• Угловая погрешность определяется углом δ между вторичным напряжением $\underline{U}_2'$ и первичным напряжением $\underline{U}_1$. Ввиду малости угла δ можно считать, что $OE = OF$ (см. рис. 23.3). Тогда $\operatorname{tg}\delta = \delta = EF/OF$ или (в угловых минутах) [23.1]

$$\delta = 3440\frac{I_0\,(r_1\cos\psi - x_1\sin\psi) + I_2'\left[\left(r_1 + r_2'\right)\sin\varphi_2 - \left(x_1 + x_2'\right)\cos\varphi_2\right]}{U_1} \tag{23.4}$$

Погрешность по углу состоит также из двух частей: первой, определяемой током холостого хода, и второй, зависящей от тока нагрузки. Из (23.4) следует, что индуктивное сопротивление обмоток вносит отрицательную угловую погрешность, а активное — положительную. Зависимость угловой погрешности δ от вторичной мощности P при различных значениях $\cos\varphi_2$ приведена на рис. 23.4, *б*. В режиме холостого хода угловая погрешность положительная. При чисто активной нагрузке ($\cos\varphi_2 = 1$) с ростом мощности угловая погрешность изменяет знак и становится отрицательной. При $\cos\varphi_2 = 0{,}5$ угловая погрешность линейно растет с мощностью и остается все время положительной. Следует отметить, что характер нагрузки ($\cos\varphi_2$) оказывает большее влияние на угловую погрешность, чем на погрешность по напряжению (см. рис. 23.4, *а* и *б*).

Погрешность по напряжению можно компенсировать путем уменьшения числа витков первичной обмотки. При этом коэффициент трансформации становится меньше номинального, вторичное напряжение возрастает, вводится положительная погрешность, которая компенсирует отрицательную. Обычно вводится такая коррекция, что при холостом ходе трансформатор имеет максимально допустимую для данного класса точности положительную погрешность.

Результирующая погрешность по напряжению при отмотке первичных витков выражается уравнением

$$\Delta U_{\%} = -$$

$$- \frac{I_0 (r_1 \sin\psi + x_1 \cos\psi) + I_2' \left[(r_1 + r_2') \cos\varphi_2 + (x_1 + x_2') \sin\varphi_2 \right]}{U_1} \times$$

$$\times 100\% + \frac{w_{1\text{ном}} - w_1}{w_{1\text{ном}}} 100\%. \qquad (23.5)$$

На угловую погрешность витковая коррекция не влияет.

В трехфазных ТН угловую погрешность можно компенсировать с помощью специальных компенсирующих обмоток [23.1]. При активной нагрузке вносится положительная коррекция. При индуктивной нагрузке применяется схема соединений, создающая отрицательную коррекцию.

23.2. КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

При напряжении до 35 кВ конструкции ТН и силовых трансформаторов аналогичны. При этом индукция в магнитопроводе значительно меньше, чем у силовых трансформаторов. Это снижает погрешность, позволяет в некоторых случаях проводить испытания индуцированным напряжением. Для испытания ТН на выводы вторичной обмотки подается удвоенное напряжение частотой 50 Гц. На первичной обмотке появляется также удвоенное напряжение. Индукция не должна превышать индукцию насыщения.

При эксплуатации возможны случаи, когда первичная обмотка, рассчитанная на работу при фазном напряжении, попадает под линейное напряжение вместо фазного. При этом магнитопровод не должен насыщаться.

Для напряжений до 35 кВ выпускаются однофазные ТН, у которых оба или один из выводов обмотки высокого напряжения изолированы от земли (второй вывод заземлен). На рис. 23.5, *а* показан однофазный ТН на напряжение 6 кВ с масляной изоляцией. Оба вывода первичной обмотки изолированы от корпуса.

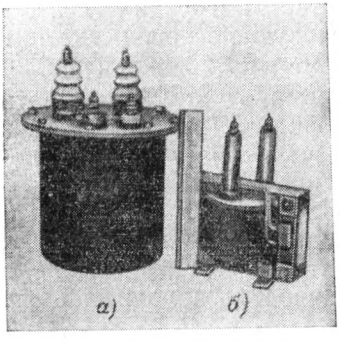


Рис. 23.5. ТН с масляной (*а*) и литой (*б*) изоляцией

Перспективным является отказ от масляной изоляции. В этом случае применяется заливка ТН эпоксидным компаундом. Наряду с резким сокращением массы и габаритов упрощается эксплуатация, делается ненужным уход за маслом. Трансформаторы с литой пластмассовой изоляцией пожаробезопасны, удоб-

ны в передвижных установках и КРУ. Для сравнения на рис. 23.5 показаны ТН с одинаковыми параметрами при масляной и литой изоляции.

Габариты ТН в значительной степени определяются изоляцией. Поэтому там, где возможно, ТН включаются между фазой сети и землей, что исключает необходимость в изоляции заземленного вывода первич-

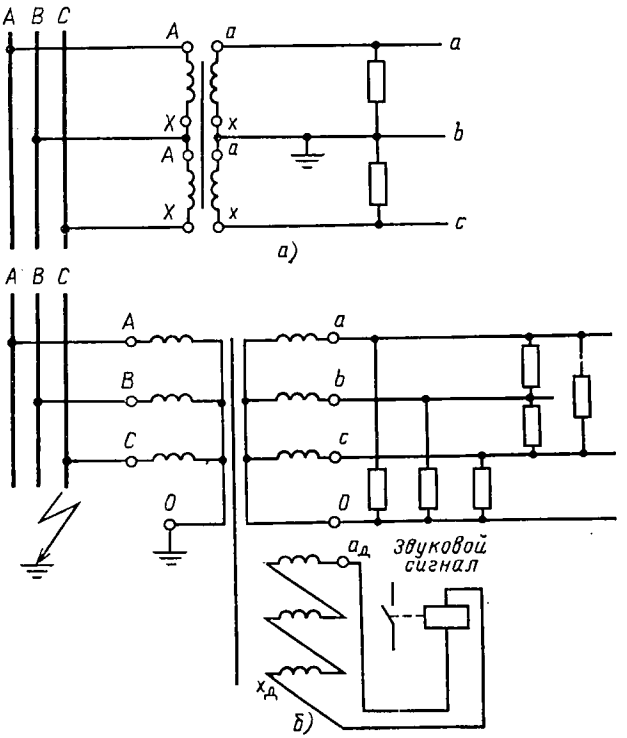


Рис. 23.6. Схемы включения ТН в трехфазных цепях

ной обмотки. Линейное напряжение получается путем соединения в звезду вторичных обмоток таких ТН. Такие способы позволяют уменьшить габариты, массу и стоимость ТН.

Основные схемы включения однофазных ТН нормального исполнения показаны на рис. 23.6. В схеме рис. 23.6, *а* используются ТН, у которых оба вывода первичной обмотки изолированы от земли. Такая схема удобна при измерении мощности и энергии. К каждому ТН может подключаться номинальная нагрузка. Схема позволяет получать как

фазное, так и линейное напряжение $U_{CA}=-(U_{AB}+U_{BC})$. В последнем случае измерительные приборы подключаются между точками a и c. Однако при таком включении создаются дополнительные погрешности за счет тока приборов, проходящего через обе вторичные обмотки. В этом случае нагрузка ТН должна быть меньше номинальной.

В схеме рис. 23.6, *б* могут применяться ТН с одним заземленным выводом первичной обмотки. Каждая из обмоток подключена к фазному напряжению сети, поэтому номинальное напряжение ТН должно равняться $U_{ном}/\sqrt{3}$. Нагрузка подключается по схеме звезды или треугольника. Номинальное напряжение каждой вторичной обмотки равно $100/\sqrt{3}$.

Для контроля сопротивления изоляции и питания защиты, срабатывающей при КЗ на землю, имеются дополнительные обмотки, которые включаются по схеме разомкнутого треугольника $a_д x_д$. При симметричном режиме сумма ЭДС, наводимых в этих обмотках, равна нулю. Если один из проводов заземляется, то равновесие ЭДС нарушается и на выводах разомкнутого треугольника возникает напряжение, которое подается на звуковой сигнализатор.

Возможны два режима работы схемы рис. 23.6, *б*. Если нейтраль сети изолирована или заземлена через реактор, то заземление одной из фаз сети, например C, не ведет к КЗ. Установка может оставаться длительное время в работе. При этом напряжение на обмотке C падает до нуля, а на обмотках A и B увеличивается до линейного. В связи с этим индукция в магнитопроводах ТН A и B увеличивается $\sqrt{3}$ раз. Во избежание недопустимого нагрева и резкого возрастания погрешности магнитопроводы не должны насыщаться при таком увеличении индукции.

В установках с заземленной нейтралью заземление одной из фаз сети вызывает КЗ и срабатывание релейной защиты. Напряжение на неповрежденных фазах при этом не поднимается выше $(1{,}2 \div 1{,}3)\ U_н$.

Габариты и стоимость ТН могут быть уменьшены путем объединения трех однофазных ТН в один трехфазный. Применяются трехстержневые и пятистержневые ТН. Трехфазные трехстержневые ТН выполняются с изолированной нулевой точкой на стороне высокого напряжения. Если нулевую точку заземлить, то при заземлении одной фазы в сетях с изолированной нейтралью возникает аварийный режим работы [3.1].

Для контроля сопротивления изоляции систем с изолированной нейтралью применяются трехфазные пятистержневые ТН (рис. 23.7). При заземлении одной из фаз магнитные потоки, созданные обмотками неповрежденных фаз, замыкаются по крайним стержням, имеющим малое магнитное сопротивление. Дополнительные обмотки, соединенные в открытый треугольник $a_1 x_1$, обеспечивают работу сигнализации и ре-

лейной защиты. При симметричном режиме в сети на выходе a_1x_1 напряжение отсутствует.

При напряжениях выше 35 кВ ввиду резкого возрастания габаритов и стоимости ТН нормальной конструкции применяются каскадные ТН. В двухкаскадном ТН на напряжение 110 кВ (рис. 23.8) каждый каскад имеет свой магнитопровод (*I* и *II*). Обмотки высокого напряжения *ВН* каждого каскада рассчитаны на 50 % фазного напряжения. Один из выводов каждой обмотки *ВН* соединен с магнитопроводом. На стороне низкого напряжения *НН* выходные обмотки *ax*, $a_дx_д$ предназначены для питания измерительных приборов и реле в схеме защиты. Обмотка связи $w_{св1}$ расположена на магнитопроводе *I*, а обмотка связи $w_{св2}$ — на магнитопроводе *II*.

При отсутствии обмоток связи, если нагрузка не подключена к выходным обмоткам, напряжение разделится поровну между обмотками *ВН*, так как их индуктивные сопротивления холостого хода одинаковы.

При включении нагрузки вторичный ток размагничивает магнитопровод *I* и поток в нем уменьшается. Реактивное сопротивление ступени *I* также уменьшается. Это ведет к тому, что напряжение между ступенями поделится неравномерно, причем большая часть ляжет на ступень *II*.

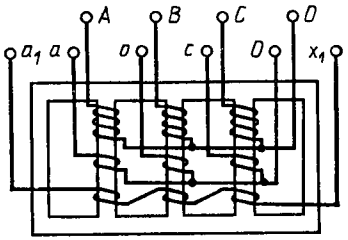


Рис. 23.7. ТН с пятистержневым магнитопроводом

Обмотки связи служат для выравнивания распределения напряжения между обмотками при включении нагрузки. При холостом ходе ЭДС в этих обмотках одинаковы, так как равны потоки в магнитопроводах *I* и *II*. Обмотки $w_{св}$ включены встречно друг другу и уравнительный ток равен нулю. При включении нагрузки поток в магнитопроводе *I* падает. ЭДС в обмотке $w_{св2}$ становится больше, чем ЭДС в обмотке $w_{св1}$. В результате в этих обмотках протекает уравнительный ток, который размагничивает магнитопровод *II* и подмагничивает магнитопровод *I*. Этот ток таков, что верхний элемент воспринимает на себя половину нагрузки, включенной на выходных обмотках.

Более совершенным является вариант рис. 23.8, *б*. При этом же напряжении $110/\sqrt{3}$ кВ ТН имеет один магнитопровод. На верхнем горизонтальном стержне магнитопровода расположены обмотки связи $w_{св1}$ и первая обмотка высокого напряжения $ВН_1$, на нижнем — обмотка связи $w_{св2}$, вторая обмотка высокого напряжения $ВН_2$ и две обмотки низкого напряжения *НН*. Один из концов каждой обмотки $ВН_1$ и $ВН_2$ соединяется с магнитопроводом. Каждая обмотка ВН имеет изо-

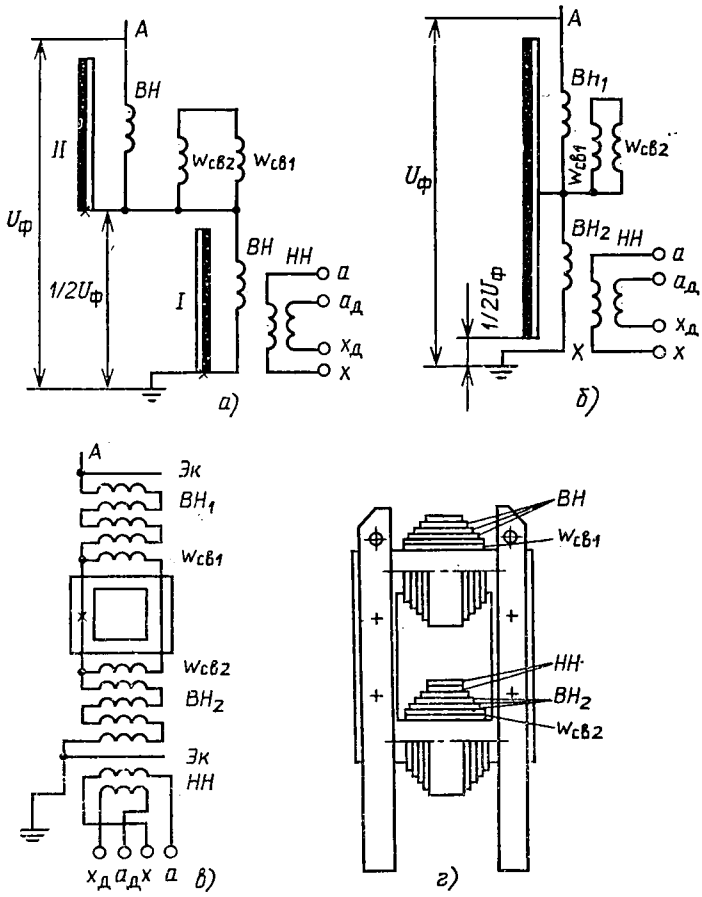


Рис. 23.8. Каскадные трансформаторы напряжения

ляцию относительно магнитопровода, рассчитанную на напряжение $^1/_2$ $U_ф$, что уменьшает размеры ТН. Собранный магнитопровод с изоляционными стойками показан на рис. 23.8, *г*.

В трансформаторах на напряжение 110 кВ для снижения атмосферных перенапряжений необходимо равномерное распределение напряжения по катушкам обмотки *ВН*. С этой целью поверх обмоток *ВН* располагаются экраны *Эк*, которые электрически соединяются с последними витками этих обмоток. Магнитопровод с обмотками крепится на

изоляционных стойках, устанавливается в фарфоровый кожух и заливается маслом.

ТН на напряжение 220 кВ собирается из двух ТН на 110 кВ. Аналогично выполняются ТН на напряжения до 500 кВ. Для выравнивания напряжения между каскадами применяют охранные кольца. Изоляция верхних элементов, подвергающихся большей электрической нагрузке, соответственно усиливается.

Результирующее активное и индуктивное сопротивление обмоток каскадных ТН значительно больше, чем у ТН нормального исполнения. Поэтому для получения высокого класса точности приходится снижать нагрузку.

Как указывалось, для ТН характерна малая плотность тока в обмотках. В том случае, когда ТН используется как источник мощности и погрешность не играет особой роли, нагрузку обмоток можно значительно увеличить. Так, например, для ТН типа НОМ-10 при классе точности 0,5 допустима нагрузка 80 В·А, хотя максимальная мощность, которая может быть снята со вторичной обмотки, равна 720 В·А.

23.3. ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Помимо электромагнитных ТН для понижения высокого напряжения могут быть использованы емкостные делители. Принципиальная схема подобного устройства, понижающего напряжение сети 500 кВ, приведена на рис. 23.9. Делитель *Д* состоит из конденсаторной батареи *C1* и конденсатора *C2*.

В чисто емкостной цепочке (цепь ТН A_1X разомкнута) напряжение $U_ф$ делится обратно пропорционально значениям емкостей. Емкость *C2* на порядок больше *C1*, и ток цепочки определяется конденсатором *C1*. Емкость *C2* выбирается так, чтобы напряжение на ней U_{c2} находилось в пределах 4—12 кВ. Для дальнейшего понижения напряжение через реактор *P* подается на ТН нормального исполнения и низкой стоимости. Нагрузка, имеющая номинальное напряжение 100 В, включается на вторичную обмотку этого ТН.

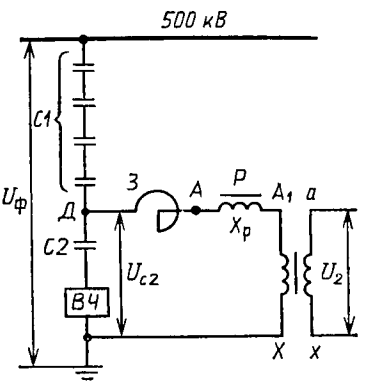


Рис. 23.9. Емкостный делитель

Если в схеме отсутствует реактор *P*, то с ростом нагруз-

ки уменьшается входное сопротивление ТН и выходное напряжение начинает падать. Если реактор настроен в резонанс с емкостью C_1+C_2 при частоте сети $f=50$ Гц, то выходное напряжение мало зависит от нагрузки.

Для выявления основных свойств делителя примем, что ТН идеальный и погрешности не вносит. Если пренебречь током холостого хода ТН, то схема рис. 23.9 может быть преобразована в схему рис. 23.10. Трансформатор и нагрузку можно заменить сопротивлением нагрузки Z_2', приведенным к первичной обмотке ТН.

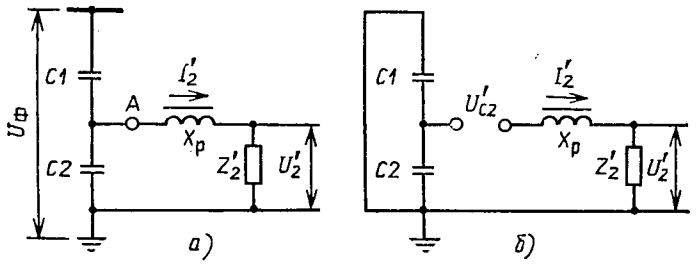


Рис. 23.10. Упрощенная расчетная схема емкостного делителя

Воспользуемся методом наложения и, разомкнув цепь в точке A, определим напряжение на разрыве:

$$U'_{C2} = U_\phi \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Теперь замкнем накоротко источник питания, а в разрыве включим напряжение $\underline{U}'_{C2}$ (рис. 23.10, *б*)

$$\underline{U}'_{C2} = j\underline{I}'_2 X_p - j\underline{I}'_2 \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)} + \underline{U}'_2.$$

Поскольку реактор настроен в резонанс с емкостью C_1+C_2, то

$$X_p = \omega L_p = \frac{1}{\omega (C_1 + C_2)},$$

тогда

$$U'_{C2} = U_\phi \frac{C_1}{C_1 + C_2} = U'_2.$$

Таким образом, при наличии реактора, настроенного в резонанс, напряжение на нагрузке U_2' определяется только отношением $C_1/(C_1+C_2)$ и не зависит от Z_2'. При сделанных допущениях погрешности определяются трансформатором ТН.

С ростом тока I_2' напряжение U_2' практически остается постоянным, в то время как напряжение на реакторе $|I_2'X_р| = |I_2'/[\omega(C_1+C_2)]|$ пропорционально растет. В результате на конденсаторе *С2* возможно появление опасных для его работы напряжений. При КЗ на вторичной стороне появятся перенапряжения на конденсаторе *С2*, которые могут привести к его пробою. Для ограничения этих перенапряжений параллельно конденсатору *С2* ставится разрядник или используется аппарат защиты от КЗ в цепи нагрузки.

При использовании в качестве конденсатора *С1* конденсаторной бумагомасляной изоляции проходных изоляторов мощность полезной нагрузки ограничивается из-за малости емкости *С1*. Так, при номинальном напряжении $U_{ном} = 110$ кВ мощность нагрузки составляет 15 В·А.

Погрешность по напряжению достигает 5 %, а угловая погрешность доходит до 5°. В настоящее время в релейной защите высоковольтных линий широко используются сигналы высокой частоты. Релейная защита, работающая на высокой частоте (блок *ВЧ*, рис. 23.9), связана с линией высокого напряжения через конденсатор *С1*. Сигналы высокой частоты подаются в линию высокого напряжения и воспринимаются устройством, расположенным в другой точке линии. Для таких защит разработаны специальные конденсаторы большой емкости. Эти конденсаторы используются в емкостном делителе и дают возможность увеличить мощность нагрузки до 1000 В·А. Для того чтобы не пропускать токи высокой частоты, в цепь ТН устанавливается высокочастотный заградитель *З*, играющий роль фильтра. Емкостный делитель может быть использован также для отбора больших мощностей (многих киловольт-ампер) вместо понижающих силовых трансформаторов.

В СССР выпускаются емкостные делители мощностью до 300 В·А первого класса точности. Исследования показали возможность создания делителей класса точности 0,2.

В конструкции реакторов и ТН предусмотрена возможность регулирования параметров для компенсации технологических разбросов по емкости конденсаторов делителя.

Индуктивность реактора регулируется изменением воздушного зазора в магнитопроводе и с помощью отводов обмотки. В ТН с помощью отводов обмотки регулируется коэффициент трансформации.

Сравнение стоимости емкостного делителя и каскадных ТН показывает, что делители целесообразно применять при напряжениях выше 110 кВ. При напряжениях 400 кВ и выше стоимость емкостного делителя примерно в 2 раза ниже стоимости каскадного ТН. При напряжении ниже 110 кВ использование делителя не дает ощутимого экономического эффекта.

Наличие конденсаторов делителя и нелинейных индуктивностей создает возможность феррорезонансных явлений не только на основной, но и на низших частотах (субгармониках).

В результате таких явлений могут возникать перенапряжения, опасные для изоляции, а также ложные срабатывания защиты. Возможно даже повреждение присоединяемых приборов. В настоящее время разработано много схем, эффективно ограничивающих эти перенапряжения.

Работа делителя зависит также от изменения частоты измеряемого напряжения, так как при этом возможны нарушения условия резонанса между реактором и конденсаторами.

23.4. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1\text{ном}}$ ТН должно соответствовать номинальному напряжению сети, в которую он включается. Если ТН включается между фазой и землей — то номинальному фазному напряжению.

Номинальное вторичное напряжение ТН должно соответствовать номинальному напряжению нагрузки.

Нагрузка должна быть равномерно распределена по фазам ТН. Суммарная нагрузка на фазу ТН должна быть меньше допустимой при заданных классе точности и коэффициенте мощности.

Сечение проводников, соединяющих ТН с нагрузкой, должно быть таким, чтобы падение напряжения на них составляло доли процента номинального вторичного напряжения.

Глава двадцать четвертая

КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

24.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Распределительное устройство (РУ) представляет собой совокупность соединенных между собой электрических аппаратов, предназначенных для приема и распределения электрической энергии. В функции РУ входит также защита сети и обслуживающих ее электрических аппаратов от КЗ и ненормальных режимов. Различают сборные и комплектные РУ (КРУ). Сборные РУ на напряжение 6—35 кВ монтируются в специально построенных кирпичных или железобетонных капитальных зданиях. Масляные выключатели монтируются в железобетонных ячейках, рассчитанных на возможность взрыва.

Сборные РУ на напряжение выше 35 кВ строятся открытого типа (ОРУ) и не требуют строительства капитальных зданий. Отдельные электрические аппараты поступают с заводов, монтируются и налаживаются на месте установки. Значительного улучшения технических, эксплуатационных и экономических характеристик можно достигнуть применением КРУ. Все входящие в КРУ электрические аппараты (коммутационные аппараты, измерительные трансформаторы, аппараты управления, устройства релейной защиты и автоматики и т. п.) монтируются заводом-изготовителем вместе со всеми электрическими соединениями на общем металлическом основании.

Различают КРУ, предназначенные для работы в закрытом помещении и для наружной установки на открытом воздухе (КРУН). В конструкции КРУН предусматривается защита электрических аппаратов и всех электрических соединений от воздействия окружающей среды (дождя, снега, тумана, пыли, ветра).

По сравнению со сборными КРУ имеются следующие преимущества:

1. Значительно уменьшается трудоемкость проектирования и строительно-монтажных работ.

2. Улучшается качество электроустановок, увеличивается надежность их работы, безопасность обслуживания и сокращаются эксплуатационные расходы.

3. Обеспечивается возможность модернизации и реконструкции.

4. Изготовление КРУ ведется индустриальным методом с широким применением механизированного труда. Технологические операции разбиваются на простейшие, что позволяет автоматизировать изготовление и контроль качества.

24.2. КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА НАПРЯЖЕНИЕ 6—35 кВ

С целью уменьшения размеров, улучшения эксплуатационных характеристик и повышения надежности к электрическим аппаратам КРУ предъявляются следующие требования:

1. Выключатели должны обладать малыми габаритами и встроенным приводом, высокой износостойкостью, пожаро- и взрывобезопасностью. Они должны снабжаться розеточными или пальцевыми контактами. С учетом этих требований в КРУ применяются маломасляные, электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели.

2. Трансформаторы тока и напряжения применяются с литой изоляцией, обладающей высокой электрической и механической прочностью. Такие трансформаторы не требуют ухода в эксплуатации.

3. Разъединители должны быть механически связаны с выключателем и обеспечивать электробезопасность при выкатывании выключателя, смонтированного на тележке. Монтаж выключателя с приводом на выкатных тележках позволяет легко производить ревизию и профилактические работы. Подвижные контакты разъединителя выполняются в виде розетки или пальцевых контактов, устанавливаемых на выводах выключателя. Неподвижные контакты в виде штыря или шины крепятся на специальных опорных изоляторах. При выкатывании тележки из КРУ контакты разъединителя размыкаются, а на концы выходного силового кабеля накладывается заземление с помощью заземлителя, привод которого сблокирован с механизмом тележки выключателя. При вкатывании тележки пальцы подвижных контактов разъединителя охватывают неподвижные и создают надежный контакт. Эта конструкция обеспечивает пропускание номинальных токов до 3000 А.

4. Разрядники и предохранители должны иметь малые габаритные размеры и требовать минимального ухода в эксплуатации. Для защиты от перенапряжений исполь-

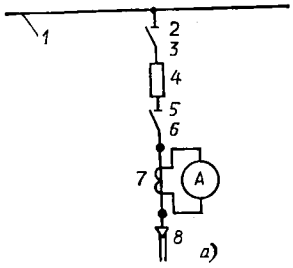
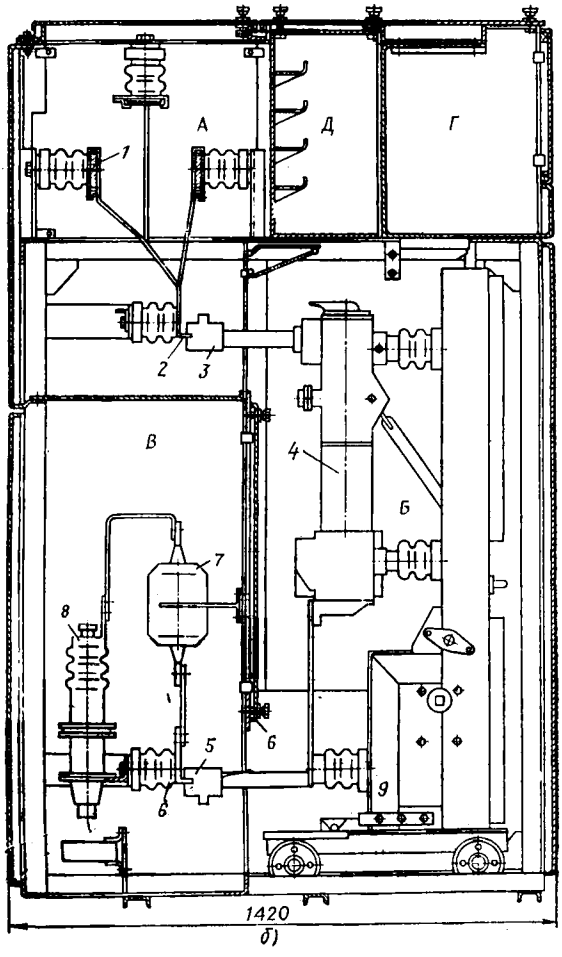


Рис. 24.1, Типовая ячейка КРУ



зуются вентильные разрядники типов РВО, РВРД. Предохранители устанавливаются для защиты КРУ от повреждений в измерительных ТН и трансформаторах собственных нужд, которые питаются через КРУ. Применяются предохранители с кварцевым наполнением серий ПКТН и ПК. Типовая ячейка КРУ с маломасляным выключателем показана на рис. 24,1, *б*. Электрическая схема цепи высокого напряжения приведена на рис. 24.1, *а*. Сборные шины *1* соединяются с неподвижным контактом *2* верхнего разрыва разъединителя. Подвижный контакт *3* расположен на верхнем выводе выключателя *4*. Нижний вывод выключателя соединяется с подвижным контактом *5* нижнего разрыва разъединителя. Неподвижный контакт *6* соединяется с ТТ *7*. Второй вывод ТТ связан с жилой высоковольтного кабеля *8*.

Основой ячейки является стальной сварной каркас, к которому крепится входящее в нее оборудование. Внутри ячейка разбита на отсеки. Разбиение объема КРУ на ячейки, а ячеек на отсеки диктуется тем, что возможные повреждения отдельных элементов не должны вызывать выход из строя всей ячейки или повреждение всего КРУ.

В отсеке *А* устанавливаются сборные шины *1* КРУ, закрепленные на опорных изоляторах. В отсеке *Б* располагается выключатель *4* с приводом *9*. Отсек *В* содержит измерительный трансформатор тока *7* и выходной кабель с концевой разделкой *8*.

В отсеке *Д* располагаются кабели управления, а в отсеке *Г* — аппараты релейной защиты и приборы для измерений.

Присоединение выключателя *4* к сборным шинам и ТТ производится с помощью втычных разъединителей *2*, *3* и *5*, *6* с розеточным или пальцевым контактом.

При возникновении дуги между шинами появляется электродинамическая сила, которая со скоростью в сотни метров в секунду перемещает дугу, при этом дуга причиняет большие разрушения. Для того чтобы воспрепятствовать движению дуги, в настоящее время начинает применяться ошиновка с твердой изоляцией в виде стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. При наличии такой изоляции дуга не может перемещаться вдоль шин.

Ввиду того что перегородки между ячейками изготовлены из листовой стали и имеют небольшую прочность, взрыв выключателя может привести к разрушению и ячейки,

и всего КРУ. Поэтому в КРУ применяются пожаро- и взрывобезопасные выключатели. В КРУ, показанном на рис. 24.1, применен выключатель ВМП-10.

Газы, выходящие из выключателя при отключении, должны иметь свободный выход из ячейки во избежание возможного взрыва. При большой мощности отключения выхлопные газы должны выбрасываться в атмосферу с помощью специальных газопроводов. Для уменьшения опасности взрыва негерметизированные контакты схемы управления выключателем выносятся в другой отсек.

Стенки КРУ имеют небольшую толщину и большую поверхность. Деформация их возможна даже при небольших избыточных давлениях внутри ячейки. Поэтому желательны предохранительные клапаны сброса давления. При появлении повышенного давления внутри КРУ из-за наличия электрической дуги предохранительный клапан открывается и ограничивает давление.

При мощностях отключения до 350 МВ·А рациональным является пружинный привод, встроенный в механизм самого выключателя. Ввиду малой мощности двигателя такого привода (100 Вт) отпадает необходимость применения мощного автономного источника питания (аккумулятора).

В современных КРУ выключатель монтируется на тележке. Механизм выкатывания тележки сблокирован с механизмом выключателя. Выкатывание возможно только при отключенном включателе.

Тележка выключателя имеет три фиксированных положения: рабочее, когда разъединители включены, промежуточное, когда разъединители отключены, но цепи управления приводом выключателя остаются включенными, и третье — ремонтное, когда все цепи отключены и выключатель можно выкатить из ячейки полностью и направить на ремонт. Вместо него может быть установлен резервный выключатель на те же параметры.

При переводе тележки из рабочего положения в промежуточное металлические шторы *б* (рис. 24, *б*) закрывают отверстия в перегородке ячейки и отделяют отсек *Б* выключателя от отсеков *А* и *В*, которые могут находиться под высоким напряжением. При вкатывании тележки с выключателем эти шторы открываются.

В промежуточном положении тележки механизм выключателя может быть проверен, так как цепи управления остаются включенными.

В ячейке измерения напряжения устанавливаются пока масляные трансформаторы серий НОМ, НТМ и др. Эти трансформаторы пожароопасны, занимают много места и требуют специальной ячейки для их размещения. Перспективны трансформаторы типа НОЛ с твердой литой изоляцией, надежность которых позволяет отказаться от предохранителей на их входах.

Аппаратура релейной защиты и измерительные приборы монтируются на откидной передней крышке отсека *Г*. При ревизии и ремонте эта крышка открывается и все приборы становятся легкодоступными. Соединение приборов с остальной схемой вторичной коммутации осуществляется многожильным гибким кабелем.

Более совершенны маломасляные выключатели ВК-10 с теми же электрическими параметрами, что и выключатели ВМП-10, но со значительно меньшими габаритами. В связи с этим выпускаются новые КРУ серии КМ-1, ширина ячейки для которых уменьшается с 900 до 750 мм (рис. 24.2). Выключатель *1* вместе с пружинным приводом *2* рас-

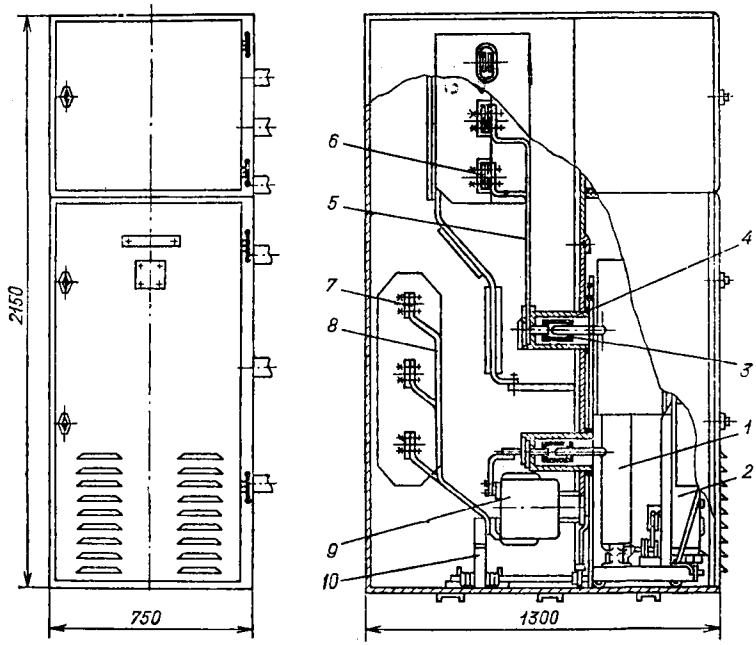


Рис. 24.2. КРУ серии КМ-1

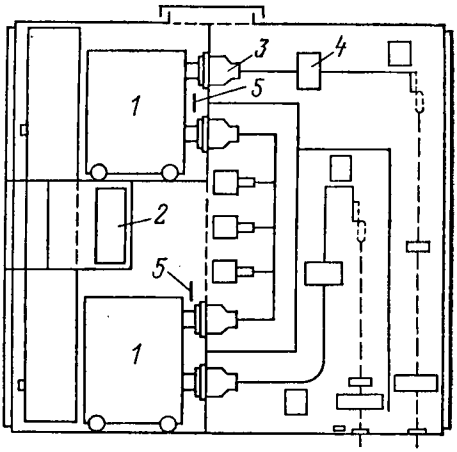


Рис. 24.3. КРУ с двухъярусным расположением вакуумных выключателей

положен на выкатной тележке. Соединение выключателя со схемой КРУ осуществляется с помощью розеточных контактов *3*. Контакты защищены от пыли и грязи изоляционными колпаками *4*. Сборные шины *6* соединены с контактом разъединителя *3* спуском *5*.

Нижний вывод выключателя соединен с выходными шинами *7* с помощью шин *8*. Трансформатор тока *9* имеет литую изоляцию. После выкатывания тележки заземление шин *8* осуществляется заземлителем *10*.

Малые габариты вакуумных выключателей позволяют резко сократить габариты КРУ. На рис. 24.3 показано схематичное изображение КРУ с двухъярусным расположением вакуумных выключателей на напряжение 7,2 кВ, номинальный ток до 3 кА и номинальный ток отключения до 40 кА. На рисунке обозначены: *1* — вакуумные выключатели; *2* — отсек сборных шин; *3* — разъемные контакты; *4* — трансформаторы тока; *5* — защитный щит.

Ресурс вакуумного выключателя составляет 10^4 отключений номинального тока. Время непрерывной работы КРУ без ревизии достигает 10 лет.

Для установок с частыми коммутациями номинальных токов выпускаются КРУ с электромагнитными выключателями серий ВЭМ-10 и ВЭ-10. Для выключателей ВЭ-10 допустимое число коммутаций номинального тока достигает $(5 \div 10) \cdot 10^3$ при токах 3,6—1,6 кА соответственно.

КРУ на напряжение 10 кВ и номинальный ток 3000 А для наружной установки (КРУН) показано на рис. 24.4. Маломасляный выключатель типа ВМПЭ-10 с приводом *1* расположен на тележке *2*. На этой же тележке установлен трансформатор тока *3*. Для подключения используются разъемные контакты *4* и *5* пальцевого типа. Сетевое напря-

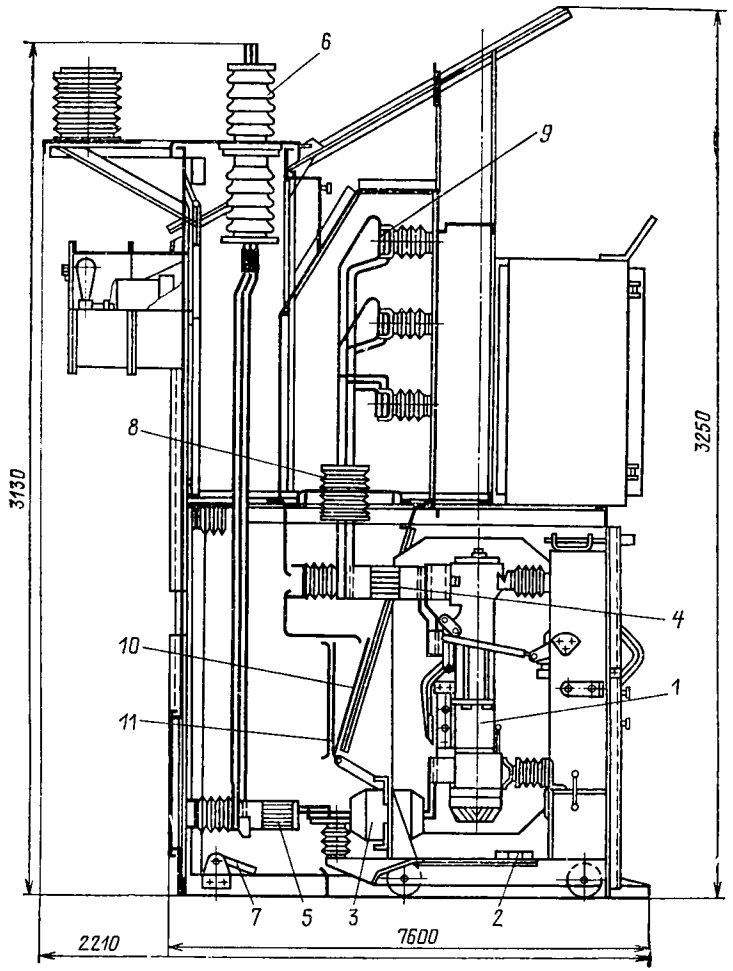


Рис. 24.4. КРУ для наружной установки (КРУН)

жение подается через проходной изолятор *6* на нижний контакт *5*. Заземление входной линии осуществляется заземлителем *7*. Верхний контакт *4* через проходной изолятор *8* соединяется со сборными шинами *9*. При выкатывании тележки *2* шторка *10* перемещается вверх, а шторка *11* вниз и закрываются проемы к верхним и нижним неподвижным контактам разъединителя.

Развитие заводских методов изготовления привело

к созданию комплектных трансформаторных подстанций (КТП), в которых помимо приема и распределения электрической энергии осуществляется ее преобразование. В КТП силовой понижающий трансформатор, коммутационная и защитная аппаратура высокого и низкого напряжения, измерительные приборы комплектуются в заводских условиях, что дает большой экономический эффект, повышает надежность энергоснабжения и ускоряет ввод новых мощностей. Большие преимущества КТП привели к их широкому распространению в сетях напряжением до 110 кВ.

24.3. ЭЛЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

В связи с ростом городов, укрупнением промышленных предприятий и широкой автоматизацией производственных процессов резко возрастает потребление электроэнергии. При этом возникает необходимость максимального приближения линий 110, 220, 330 кВ к потребителям. При таких напряжениях допустимые изоляционные расстояния в воздухе между токоведущими частями РУ очень велики. Это приводит к резкому увеличению габаритов как самих РУ, так и зданий и площадей для их установки. Существующие открытые РУ создают большие радиопомехи и звуковые эффекты (выстрелы), связанные с работой воздушных выключателей.

Выходом из этого положения является создание РУ, в которых изоляция осуществляется твердыми и жидкими изоляционными материалами или газами под повышенным давлением. Твердая изоляция распространения не получила — трудно обеспечить надежную изоляцию при переходе от одного элемента РУ к другому. Минеральное масло из-за пожаро- и взрывоопасности не применяется. Другие жидкости (негорючие хлорированные масла) дороги, выделяют хлор. Поэтому наиболее подходящими являются газы — воздух и элегаз. Первый требует высокого давления, а следовательно, большой прочности оболочек. Поэтому элегаз нашел преимущественное применение. Свойства элегаза рассмотрены в § 18.6. Площадь, занимаемая КРУ с напряжением 110, 220 кВ, может быть уменьшена в 10—15 раз за счет использования элегаза. В элегазовых КРУ (КРУЭ) элегаз используется и как изолирующая, и как дугогасящая среда. Заключение в металлические оболочки токоведущих цепей высокого напряжения (экранирование)

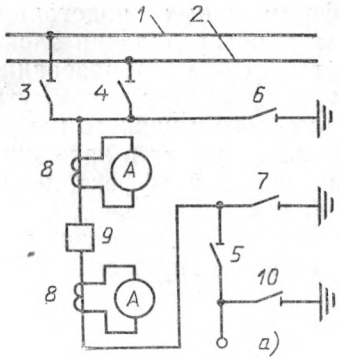
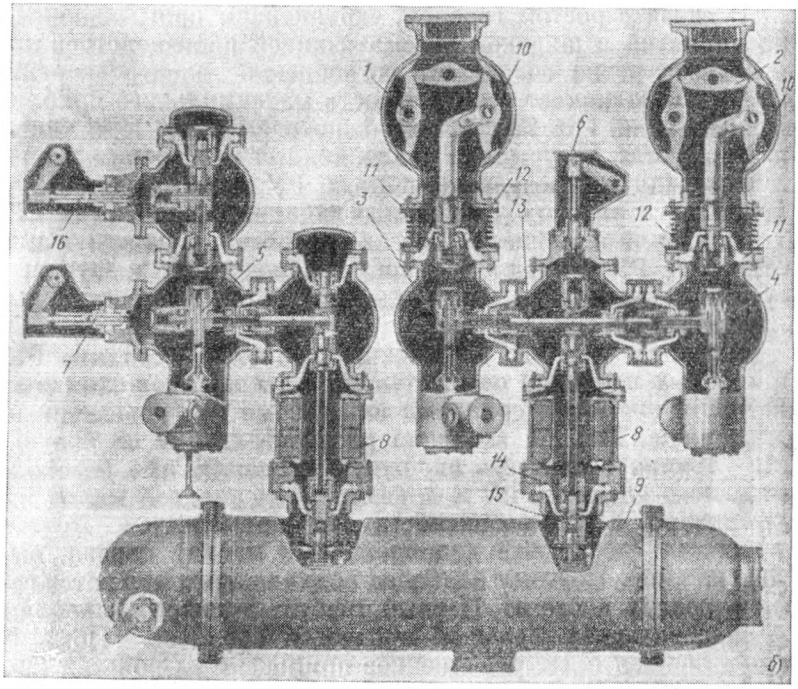


Рис. 24.5. КРУЭ на напряжение 110 кВ



резко снижает уровень радиопомех. Применение элегазовых выключателей, работающих без выброса газа в окружающую среду, делает работу КРУЭ бесшумной.

На рис. 24.5 показано КРУЭ на напряжение 110 кВ производства НПО «Электроаппарат». Однолинейная

электрическая схема цепи высокого напряжения дана на рис. 24.5, *а*. Здесь *1* и *2* — системы сборных шин; *3*, *4*, *5* — разъединители; *6*, *7*, *10* — заземлители; *8* — трансформаторы тока (по четыре на фазу); *9* — выключатель. Трехфазные системы трубчатых шин *1* и *2* расположены в алюминиевой оболочке *10* (рис. 24.5, *б*). Отсек сборных шин отделен от отсека разъединителей *3* и *4* перегородкой *11*, к которой прикреплены неподвижные контакты разъединителей *12*. Перегородка позволяет сохранять давление в одном элементе (разъединителе) при потере герметичности в другом (отсеке шин). Разъединители *3* и *4* позволяют подключать правый ввод выключателя к любой (*1* или *2*) системе сборных шин.

При ремонте выключателя *9* перемычка *13* между разъединителями *3* и *4* соединяется с землей заземлителем *6*. Разъединители и заземлители имеют пневматический привод.

С перемычки *13* ток через разъемный розеточный контакт *14* подается на вывод *15* выключателя *9*. Трансформаторы тока *8* и трансформатор напряжения (на рис. 24.5, *б* не показан) имеют элегазовую изоляцию.

Элегазовый выключатель снабжен одним ДУ на полюс, конструкция которого показана на рис. 18.23. Привод выключателя пневматический (давление 2 МПа).

Через ТТ ток подается на выходной разъединитель *5*. Заземлитель *7* заземляет левый вывод включателя. Выходная линия заземляется заземлителем *10*.

Основные параметры КРУЭ:	
Номинальное напряжение, кВ	110
Номинальный ток сборных шин, кА	1,6
Номинальный ток выключателя, кА	1,25
Номинальный ток отключения выключателя, кА	40
Наибольший ток включения (ударный ток), кА (амплитуда)	102
Собственное время отключения выключателя с приводом, с	0,04±0,005
Скорость контактов в момент размыкания выключателя, м/с	5,5
Собственное время включения выключателя с приводом, с	0,08±0,02
Время горения дуги в выключателе, с	0,02
Номинальное избыточное давление элегаза, МПа:	
в выключателе	0,6
в ТН	0,4
в других элементах	0,25

В настоящее время ведутся разработки КРУЭ на все классы напряжения до 1150 кВ.

Нагревостойкость электроизоляционных материалов (по ГОСТ 8865-87)

Класс нагревостойкости	Температура, °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
У	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
А	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие сочетания материалов
Е	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
200 220 250	200 220 250	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

Допустимые превышения температуры элементов аппаратов низкого напряжения (для температуры окружающего воздуха +40° С)

Название частей аппарата	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
1. Контакты, коммутирующие главные цепи:				
а) из меди	55	40	65; см. примечания 1,2	65; см. примечание 1
б) гальванически покрытые серебром	См. примечание 3	50	См. примечание 3	65
в) с накладками из серебра и металлокерамических композиций на базе серебра с окисью кадмия или с окисью меди	См. примечание 4	50	См. примечание 4	65
2. Вспомогательные контакты с накладками из серебра	80	50	80; см. примечание 2	65
3. Контактные соединения внутри аппаратов и неразмыкаемые винтовые, болтовые, заклепочные и другие жесткие соединения (кроме паяных и сварных):				
а) из меди и ее сплавов; из алюминия и его сплавов без защитных покрытий контактных поверхностей	55	50	55	55

Название частей аппарата	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
б) из меди и ее сплавов, из алюминия и его сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищенные от коррозии покрытием контактных поверхностей соответствующим металлом, обеспечивающим стабильность переходного сопротивления лучше меди	65	50	65	65
в) из меди и ее сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищенные от коррозии покрытием контактных поверхностей серебром	95	50	60	65
4. Обмотки многослойных катушек с изоляционными материалами нагревостойкостью по ГОСТ 8865—70:				
класса A	65	60	80	60
» E	80	60	90	60
» B	90	60	100	60
» F	110	—	120	—
» H	130	—	140	—

Примечания:

1. При продолжительном режиме работы превышение температуры должно быть не более 55 °С.
2. Указанное превышение температуры при повторно-кратковременном режиме работы не должно увеличиваться при испытании в условиях, когда на контактах возникнет электрическая дуга.
3. Температура ограничивается нагревостойкостью соседних частей, если слой серебра не повреждается электрической дугой и не стирается при испытании на механическую износостойкость при нагретых контактах. В противном случае эти контакты должны рассматриваться как не имеющие покрытия серебром.
4. Температура ограничивается нагревостойкостью соседних частей, но не должна превышать 200 °С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Допустимые температуры нагрева элементов высоковольтных электрических аппаратов

Элементы аппаратов и комплектных распределительных устройств	Наибольшая допустимая температура нагрева, °С		Превышение температуры над температурой окружающего воздуха (+35 °С), °С	
	в воздухе	в масле	в воздухе	в масле
Токоведущие (за исключением контактных соединений) и нетоковедущие металлические части, не изолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами	120	—	85	—
То же, но соприкасающиеся с трансформаторным маслом	—	90	—	55
Токоведущие и нетоковедущие металлические части, изолированные или соприкасающиеся с изоляционными материалами, а также детали из изоляционных материалов классов нагревостойкости по ГОСТ 8865—87				
У	80	—	45	—
А	95	90	60	55
Е	105	90	70	55
В	120	90	85	55
F	140	90	105	55
Н	165	90	130	55

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Номинальные напряжения контакторов, В (ГОСТ 11206-77)

Узел аппарата	Вид тока	
	постоянный	переменный
Главная цепь	220, 440	380, 660, 1140
Втягивающая обмотка	24, 48, 60, 110, 220, 440	24, 42, 110, (127), 220, 230, 240, 380, 400, 415, (500), 660 при частоте 50 Гц
Вспомогательные контакты	от 24 до 440	от 24 до 660

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Классы контакторов по допустимому количеству циклов ВО в 1 ч ГОСТ 11206-77

Класс	Допустимое количество циклов в течение 1 ч, не более	Класс	Допустимое количество циклов в течение 1 ч, не более
0,01	1	6	600
0,03*	3*	10*	1200*
0,1*	12*	30*	3000*
0,3*	30*	36	3600
1*	120*	60	6000
3*	300*		

Примечание. Знак * стоит у значений, которые являются предпочтительными.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Технические данные вакуумных контакторов

Параметр	Напряжение, В	Номинальный ток, А		
		63	160	400
Включающая способность, А	660	2700	4600	8800
	1140	1650	2880	6500
Отключающая способность, А	660	1500	2500	4800
	1140	1000	1750	3450
Стойкость при сквозных токах, А:				
электродинамическая	660	4000	5000	10 000
термическая в течение 0,2 с	660	3200	4000	8000
	1140	3200	4000	8000
Радиус площадки касания контактов, мм	—	0,35	0,44	0,88
Контактное нажатие, Н	—	27	42	168
Переходное сопротивление контактов (стягивание), мкОм	—	275	220	110
Износостойкость, цикл	—	$(15—20)\ 10^6$		
Диапазон рабочих температур, °С	—	(—40) — (+70)		

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Технические данные гибридных контакторов серии КТ

Параметр	КТ-7000 Б	КТП-7000 Б	КТ-6500	КТП-6500	КТ-7032
Номинальный ток, А	100, 160	100, 160	100, 160	100, 160	250
Номинальное напряжение, В	380	380	660	660	380

Продолжение прилож. 7

Параметр	КТ-7000 Б	КТП-7000 Б	КТ-6500	КТП-6500	КТ-7032
Износостойкость, циклы	10^7	$15 \cdot 10^6$	10^7	$15 \cdot 10^6$	10^7
Допустимая частота циклов, 1/ч	1200	2000	1200	2000	1200
Число полюсов	2—5	2—4	2—5	2—4	2—5
Напряжение управления, В	110—380	24—220	110—380	24—220	110—500

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Технические данные главных контактов контакторов серии КТ-6000

Тип	Допустимые токи			
	продолжительный режим, А	перемежающийся режим, А	повторно-кратковременный режим (ПВ-40 %, $Z = 600$ 1/ч)	
			включение при номинальном напряжении, А	отключение при 0,17 $U_{ном}$, А
КТ-6014	60	80	480	80
КТ-6024	75	100	600	100
КТ-6022	120	180	900	160
КТ-6032	165	280	1500	250
КТ-6042	300	400	2700	400
КТ-6052	470	630	3800	630

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Технические данные по электромагнитам контакторов серии КТ-6000 и КТ-7000

Тип	Номинальный ток, А	Ток в обмотке, А				Время, с	
		рабочий при напряжении, В		пусковой при напряжении, В		срабатывания	отпускания
		220	380	220	380		
КТ-6000	100	0,21	0,14	2,1	1,4	0,04	0,02
	160	0,21	0,14	2,1	1,4	0,04	0,02
	250	0,72	0,44	7,2	4,4	0,04	0,012
	400	0,98	0,7	9,8	9,8	0,05	0,02
	630	1,65	0,98	16,5	9,8	0,05	0,02
КТ-7000	100	0,26	0,12	3,7	1,8	0,034	0,015
	160	0,26	0,12	3,9	1,8	0,03	0,01

Примечание. Контакторы на 100—160 А имеют мощность обмотки 25 Вт, число витков w и диаметр провода d при напряжениях: 220 В — $w=1430$, $d=0{,}35$ мм; при 380 В — $w=2470$, $d=0{,}27$ мм.

Технические параметры магнитных пускателей

Параметр	ПМЕ-100	ПМЕ-100	ПМЕ-200	ПАЕ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток при напряжении 380/500 В, А	3/1,5	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток при напряжении 380 В и $\cos\varphi = 0{,}4$, А	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	2 ,4±0,4	2,5±0,5	3±0,5	2,2±0,5	3,5±0,5	4±0,5	4±0,5
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
	Металлокерамика марки						
Материал контактной накладки	серебро	КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А1
Номинальная мощность обмотки, Вт	3,6	6	8	17	20	26	38
Пусковая мощность обмотки, Вт	65	130	160	260	465	800	3400
Тепловое реле	—	—	ТРН-25	ТРН-40	ТРП-60	ТРП-150	ТРП-160
Коммутационная износостойкость	$2{,}5\cdot10^6$	—	$2{,}5\cdot10^6$	10^6	10^6	10^6	10^6
Механическая износостойкость	$16\cdot10^6$	—	$16\cdot10^6$	$12\cdot10^6$	$12\cdot10^6$	10^7	10^7

Автоматические воздушные выключатели серии А-3100 и А-3700

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, З	Число полюсов	Возможность заказа с расцепителем		Ток уставки расцепителя, А	Предельный ток отключения, кА		Время отключения, С
				тепловым	электромагнитным		постоянный	переменный	
А3160	50	110 и 120	1, 2, 3	Есть	Нет	15—20	1,6—3,6	2,5—4,5	0,025
А3110	100	220	2,3	Нет	Есть	15—100	5	2,5—10	0,015
А3120	200	220	2,3	»	»	15—100	20	18	—
А3130	200	220	2,3	»	»	100—200	17—28	14—25	0,015
А3710Б—А3740Б	160—130	440, 660	2,3	Есть	»	—	110	45—60	—
А3140	600	220	2,3	Нет	»	250—600	25—50	32—40	0,03
А3710Ф—А3730Ф	160—630	220, 380	2,3	Есть	»	—	25—50	25—50	—

Примечание. Автоматы 3710Б—А3740Б токоограничивающие с полупроводниковыми или электромагнитными расцепителями. Автоматы А3710Ф—А3730Ф нетокоограничивающие с электромагнитным и тепловым расцепителями.

Предел прочности $\sigma_{см}$ различных металлов на смятие

	$\sigma_{см}$, МПа		$\sigma_{см}$, МПа
Медь твердая	520	Цинк	430
Медь мягкая	390	Олово	45
Алюминий отожженный	110	Свинец	23
Алюминий твердотянутый	150	Графит	132
Золото	530	Молибден	1690
Платина	780	Серебро	340

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К ГЛ. 1

1.1. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники. 3-е изд. Т. 1 и 2. Л.: Энергоиздат, 1981. 533 и 408 с.

1.2. **Холявский Г. Б.** Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. М.: Энергия, 1971. 156 с.

1.3. **Электрическая** часть станций и подстанций/Под ред. А. А. Васильева. М.: Энергия, 1980. 608 с.

1.4. **Основы** теории электрических аппаратов/Под ред. И. С. Таева. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.

1.5. **Кудрявцев Е. П., Долин А. П.** Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981. 96 с.

К ГЛ. 2

2.1. **Залесский А. М., Кукеков Г. А.** Тепловые расчеты электрических аппаратов. Л.: Энергия, 1967. 378 с.

2.2. **Дружинин В. В.** Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 240 с.

2.3. **Чунихин А. А.** Электрические аппараты. М.: Энергия, 1975. 647 с.

2.4. **Теория** электрических аппаратов/Под ред. Г. Н. Александрова. М.: Высшая школа, 1985. 312 с.

К ГЛ. 3

3.1. **Электротехнический** справочник МЭИ. Т.I, II.М.: Энергоиздат, 1985, 1986. 488 и 712 с.

3.2. **Родштейн Л. А.** Электрические аппараты. Л.: Энергоиздат, 1981. 304 с.

3.3. **Кузнецов Р. С.** Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970. 543 с.

3.4. **Беляев В. Л.** Результаты испытаний и опытной эксплуатации сильноточных выключателей с композиционными ЖМК//Тезисы докладов «Пути повышения качества и надежности ЖМК». Каунас: Изд-во АН СССР, 1987. С. 129—131.

К ГЛ. 4

4.1. **Буткевич Г. В.** Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973. 263 с.
4.2. **Таев И. С.** Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. М.: Энергия, 1965. 224 с.
4.3. **Техника** высоких напряжений/Под ред. Д. В. Разевига. — М.-Л.: Энергия, 1976. 488 с.
4.4. **Могилевский Г. В., Коломийцев В. Д., Бенсман В. Г.** Состояние и перспективы развития гибридных аппаратов управления//Низковольтное аппаратостроение. Чебоксары: ВНИИР, 1979. С. 37—47. (Сб. научных трудов; Вып. 6).
4.5. **Шопен Л. В.** Бесконтактные электрические аппараты. Т.3. М.: ВИНИТИ 1982. 104 с.

К ГЛ. 5

5.1. **Сливинская А. Г.** Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.
5.2. **Буль Б. К.** Основы теории и расчета магнитных цепей. М.: Энергия, 1964. 464 с.
5.3. **Сахаров П. В.** Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1971. 560 с.
5.4. **Никитенко А. Г.** Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1983. 192 с.
5.5. **Любчик М. А.** Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
5.6. **Сливинская А. Г., Гордон А. В.** Электромагниты со встроенными выпрямителями. М.: Энергия, 1970. 63 с.

К ГЛ. 6

6.1. **Шопен Л. В.** Бесконтактные электрические аппараты автоматики. — М.: Энергия, 1986. 567 с.
6.2. **Львов Е. Л.** Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. М.: Энергия, 1971. 552 с.
6.3. **Хруслов Л. Л., Ситников В. Ф., Костюхин С. Л.** Магнитные ключи в многоканальных источниках вторичного электропитания//Электросвязь. 1987. № 4. С. 62—64.

К ГЛ. 7

7.1. **Вешеневский С. Н.** Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1967. 472 с.

К ГЛ. 8

8.1. **Таев И. С.** Электрические аппараты управления. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
8.2. **Таврин В. А.** Контакторы серии МК с бездуговой коммутацией//Электротехническая промышленность, аппараты низкого напряжения. 1983. № 6. С. 21—22

8.3. **Электрические** аппараты на напряжение 1140 В/Под ред. А. М. Убийко. М.: Энергоатомиздат, 1983. 158 с.

К ГЛ. 9

9.1. **Федосеев А. М.** Релейная защита электрических систем. М.—Л.: Энергия, 1976. 559 с.

9.2. **Реле** защиты/В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов, Р. З. Розенблюм. М.: Энергия, 1976. 464 с.

9.3. **Кузнецов Р. С., Строганов Н. И.** Позисторная защита электродвигателей//Электротехника. 1980. № 12. С. 26—28.

9.4. **Зимин Е. Н.** Защита асинхронных двигателей до 500 В. М.: Энергия, 1967. 88 с.

9.5. **Справочник** по автоматизированному электроприводу/Под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. М.: Энергоатомиздат, 1983. 450 с.

9.6. **Филипченко И. П., Рыбин Г. Я.** Электромагнитные реле. М.: Советское радио, 1968. 72 с.

9.7. **Игловский И. Г., Владимиров Г. В.** Справочник по слаботочным электрическим реле. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 584 с.

К ГЛ. 11

11.1. **Коробков Ю. С., Умеренков В. К., Шибанов В. К.** Устройства автоматики на герконах. М.: МЭИ, 1983. 107 с.

11.2. **Коробков Ю. С.** Расчет магнитоуправляемых контактов, М.: МЭИ, 1982. 64 с.

11.3. **Коробков Ю. С.** Расчет электромеханических реле на герконах. М.: МЭИ, 1986. 29 с.

11.4. **Кобленц М. Г.** Силовые герконы. М.: Энергия, 1979. 177 с.

11.5. **Кобленц М. Г.** Герметичные коммутирующие устройства на силовых герконах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 176 с.

К ГЛ. 12

12.1. **Забродин Ю. С.** Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1982. 494 с.

12.2. **Лехтла Т.** Электрические аппараты защиты. Таллин: Таллинский политехнический институт, 1981. 112 с.

12.3. **Паперно Л. Б.** Проектирование устройств релейной защиты на бесконтактных элементах. М.: Высшая школа, 1979. 192 с.

12.4. **Лысенко Е. В.** Функциональные элементы релейных устройств на интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1983. 126 с.

12.5. **Элементы** управления серии «Логика И»/В. Л. Рейзин, В. Е. Мандравин, А. И. Лозарцев и др. М.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с.

12.6. **Михайлов О. П., Стоколов В. Е.** Электрические аппараты и средства автоматизации. М.: Машиностроение, 1982. 184 с.

12.7. **Поскробко А. А., Братолюбов В. Б.** Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе. М.: Энергия, 1978. 190 с.

12.8. **Мирский Г. Я.** Микропроцессоры в измерительных приборах. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.

К ГЛ. 13

13.1. **Датчики** систем автоматического контроля и регулирования/ /Д. И. Агейкин, Е. Н., Костина Н. Н. Кузнецова и др. — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1965. 928 с.

13.2. **Туричин А. М.** Электрические измерения неэлектрических величин. 5-е изд. Л.: Энергия, 1975. 690 с.

13.3. **Электрические** измерения/Под ред. Е. Г. Шрамкова. М.: Высшая школа, 1972. 518 с.

К ГЛ. 14

14.1. **Воробьева Т. М.** Электромагнитные муфты. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960. 207 с.

14.2. **Могилевский В. Г.** Электромагнитные порошковые муфты и тормоза. М.: Энергия, 1964. 104 с.

14.3. **Мизюрин С. Р., Ермилов М. А.** Проектирование магнитно-гистерезисных муфт. М.: МАИ, 1966. 123 с.

14.4. **Мастяев П. З., Орлов И. Н.** Гистерезисные электродвигатели. М.: МЭИ, 1963. 166 с.

К ГЛ. 16

16.1. **Намитоков К. К.** Плавкие предохранители. М.: Энергия, 1979. 176 с.

16.2. **Хмельницкий Р. С., Шеховцова Н. А.** Быстродействующие плавкие предохранители. М.: Информэлектро, 1983. 44 с.

16.3. **Правила** устройства электроустановок (ПУЭ). М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.

16.4. **Лившиц Д. С.** Нагрев проводников и защита предохранителями в сетях до 1000 В. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1959. 40 с.

К ГЛ.17

17.1. **Голубев А. И.** Быстродействующие автоматические выключатели. М.: Энергия, 1964. 240 с.

К ГЛ. 18

18.1. **Александров Г. Н., Иванов В. Л.** Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.

18.2. **Чунихин А. А., Жаворонков М. А.** Аппараты высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 420 с.

18.3. **Чунихин А. А., Горкин В. Д.** Влияние различных факторов на время срабатывания ИДП привода контактов синхронизированного выключателя высокого напряжения//Тр. МЭИ. 1975. Вып. 244. С. 1—7.

18.4. **Афанасьев В. В., Якунин Э. Н.** Приводы к выключателям и разъединителям высокого напряжения. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 224 с.

18.5. **Афанасьев В. В., Вишневский Ю. И.,** Воздушные выключатели. Л:. Энергоиздат, 1981. 382 с.
18.6. **Полтев А. И.** Конструкция и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. Л.: Энергия, 1979. 238 с.
18.7. **Улиссова И. Н.** Вакуумные коммутационные аппараты за рубежом. М.: Информэлектро, 1983. 80 с.
18.8. **Кукеков Г. А.** Выключатели переменного тока высокого напряжения. Л.: Энергия, 1972. 338 с.
18.9. **Чунихин А. А., Анке Э., Строганов Б. Г.** Исследование междуконтактной прочности при синхронизированном отключении//Электричество. 1975. № 10. С. 5—8.
18.10. **Справочник** по электрическим аппаратам высокого напряжения//Под ред. В. В. Афанасьева Л.: Энергоатомиздат, 1987. 542 с.

К ГЛ. 19

19.1. **Правила** устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат. 1985. 640 с.
19.2. **Афанасьев В. В., Якунин Э. Н.** Разъединители. Л.: Энергия, 1979. 216 с.
19.3. **Гогичайшвили П. Ф.** Подстанции без выключателей на высшем напряжении. М.: Высшая школа. 1965. 200 с.
19.4. **Евтушенко В. А., Чунихин А. А.** Подвесные разъединители. М.: Энергоатомиздат, 1984. 145 с.

К ГЛ. 20

20.1. **Стернин В. Г., Карпенский А. К.** Токоограничивающие реакторы. М.: Энергия, 1965. 256 с.
20.2. **Калантаров П. Л., Цейтлин А. А.** Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970. 368 с.
20.3. **Лейтес Л. В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.

К ГЛ. 22

22.1. **Бачурин Н. И.** Трансформаторы тока. Л.: Энергия, 1964. 376 с.
22.2. **Сирота И. М.** Переходные режимы работы трансформаторов тока. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 192 с.
22.3. **Чунихин А. А.** Трансформаторы для блока управления синхронизированным выключателем//Тезисы докладов на IV совещании по высоковольтному аппаратостроению, 1970.
22.4. **Чунихин А. А.** Исследование трансформатора тока без воздушного зазора для питания схемы управления синхронизированным выключателем//Тр. МЭИ, Электромеханика. 1972. № 153. С. 4.
22.5. **Чунихин А. А.** Расчет и выбор параметров трансформатора тока с немагнитными зазорами для управления синхронизированным выключателем//Электричество. 1973. № 2. С. 26—30.
22.6. **Чунихин А. А., Щеглов И. П.** Ферромагнитный трансформатор тока для измерений в переходном режиме//Электротехническая промышленность. АВН. 1976. Вып. 10(61). С 7—10.
22.7. **Чунихин А. А., Строганов Б. Г.** Исследование влияния поля

выпучивания на значение индукции в тороидальном магнитопроводе трансформатора с немагнитным зазором//Тр. МЭИ. 1980. Вып. 502. С. 14—17.

22.8. **Строганов Б. Г., Чунихин А. А.** Эффект вторичного воздействия в трансформаторах тока//Электричество. 1973. № 2. С. 67—69.

22.9. **Чунихин А. А., Строганов Б. Г.** Погрешность трансформатора тока с немагнитными зазорами в установившемся режиме при наличии индуктивности рассеяния вторичной обмотки//Электротехническая промышленность. АВН. 1980. 8(112). С. 3—5.

22.10. **Строганов Б. Г.** Трансформаторы тока с немагнитными зазорами для измерений в переходном режиме: Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. МЭИ, 1980.

22.11. **Чунихин А. А.** Расчет трансформатора тока, предназначенного для измерения в переходном режиме работы//Электротехника. 1980. № 9. С. 55—58.

22.12. **Строганов Б. Г., Чунихин А. А.** Влияние внешнего магнитного поля на работу трансформатора тока с немагнитными зазорами в переходном режиме//Тезисы докладов на VIII Всесоюзном научно-техническом совещании. Л.: 1980. 82—84 с.

23.13. **Чунихин А. А., Строганов Б. Г., Асонов В. А.** Разработка и исследование трансформатора тока для измерений в переходном режиме//Тезисы докладов на VIII Всесоюзном научно-техническом совещании. Л.: 1980. С. 77—81.

22.14. **Чунихин А. А., Тихнер Л. М.** Расчет трансформатора тока с учетом магнитного сопротивления стали в переходном режиме. ВИНИТИ.. — Депонированные научные работы. 1983. № 4, с. 3.

22.15. **Чунихин А. А., Строганов Б. Г.** Метод измерения погрешности трансформатора тока в переходном режиме//Электричество, 1985. № 3. С. 69—72.

22.16. **А. с. 1101911 СССР.** Способ измерения погрешности трансформатора тока в переходном режиме/Б. Г. Строганов, А. А. Чунихин// Открытия. Изобретения. 1984. № 25.

22.17. **Чунихин А. А., Асонов В. А.** Работа трансформатора тока в режиме АПВ//Электричество. 1988. № 5.

К ГЛ. 23

23.1. **Дымков А. М.** Трансформаторы напряжения. М.: Энергия, 1975. 204 с.

23.2. **Юренков В. Д.** Разработка и расчет подстанций с емкостными делителями напряжения 110—750 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.

К ГЛ. 24

24.1. **Двоскин Л. И.** Схемы и конструкции распределительных устройств. М.: Энергия, 1974. 516 с.

24.2. **Дорошев К. И.** Комплектные распределительные устройства 6—35 кВ. М.: Энергоиздат, 1982. 376 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматические воздушные выключатели:
быстродействующие 545
гашения магнитного поля 548
дугогасительные системы 535
механизмы 537
общие сведения 531
расцепители 539
токоведущая цепь 534
универсальные и установочные 541

Б

Бесконтактные магнитные аппараты:
магнитные реле (БМР) 275
коэффициент возврата 277
построение релейной петли 277
условие релейного режима 277
Бесконтактные полупроводниковые аппараты:
двухкаскадный усилитель 407
дешифратор 453
ключевой режим работы транзистора 406
логические элементы 443
микропроцессоры 461
однокаскадный усилитель 403
операционный усилитель в релейном режиме 419
— — общие сведения 415
полупроводниковые реле времени 430
— — защиты асинхронного двигателя 425
Бесконтактные полупроводниковые реле от замыканий на землю 424
— — напряжения 428
— — оптронные 435
— — тока 421
оптронная развязка 435
перенапряжения при работе транзистора в режиме ключа 406
переход от контактной схемы управления к бесконтактной 441
пускатели 331, 457
регистры 452
регуляторы мощности 460
релейный режим двухкаскадного усилителя 408
станции управления 459
триггеры 449

В

Выбор:
автоматов 551
выключателей 605
контактов и пускателей 334
короткозамыкателей и отделителей 618
предохранителей 520, 524, 530
разъединителей 618
резисторов 302
реле 363
трансформаторов напряжения 680
трансформаторов тока 664
Выключатели высокого напряжения:
баковые масляные 557
воздушные 576

выключатели нагрузки 602
классификация 556
маломасляные 562
общие сведения 552
основные параметры 552
приводы масляных выключателей 568
синхронизированные 598
Воздействие климатических факторов на электрические аппараты 8

Д

Датчики неэлектрических величин:
индуктивные 473
— дифференциальные 474
индукционные 481
контактные 469
магнитоупругие 480
общие сведения 466
параметры 466
резистивные 469
трансформаторные 478

З

Защитные свойства оболочки аппарата 7

К

Классификация электрических аппаратов 5
Командоаппараты:
кнопки управления 286
командоконтроллер 286
микровыключатели 290
путевой выключатель конечный 289
— — магнитно-полупроводниковый 292
— — оптический 291
универсальные переключатели 293
Комплектные распределительные устройства:
высокого напряжения 682
общие сведения 681
элегазовые 689
Контакторы:
вакуумные 324
износостойкость коммутационная 311, 336
— механическая 311
назначение и классификация 308
номинальное напряжение 312
номинальный ток 312
режим нормальных коммутаций 309
— редких коммутаций 310
Контакторы переменного тока:
дугогасительные системы 316
контактные системы 318
схема включения 329
электромагнитная система 317
Контакторы постоянного тока:
допустимый ток повторно-кратковременного режима 334
дугогасительная камера 316
дугогасительное устройство с катушкой напряжения 161
— — — — тока 160
— — — постоянными магнитами 162
контактные и токоведущие системы 313
электромагнитная система 321
Контроллеры:
барабанные 282
кулачковые 283
общие сведения 282

М

Магнитная цепь переменного тока:
магнитное сопротивление активное 202
— — реактивное 203
расчет без учета потерь в стали и магнитного сопротивления 190
расчет с учетом потерь в стали и короткозамкнутых витков 202
Магнитная цепь постоянного тока:
расчет с учетом магнитного сопротивления стали, но без рассеяния 193
— — — — — — — и рассеяния 195
— по коэффициентам рассеяния 198
Магнитные пускатели:
блокировка реверсивных пус-

кателей 330
конструкция 326, 330
назначение и требования к пускателям 326
тепловая защита 329, 355
Магнитные усилители дроссельные:
датчики тока 248
— напряжения 249
общие сведения 245
Магнитные усилители с самонасыщением:
быстродействующие 269
влияние различных факторов на характеристику управления 267
двухполупериодные 257
с малым сопротивлением цепи управления 261
динамические параметры 264
запаздывание 264
магнитопроводы 279
материалы магнитопроводов 279
обмотки 280
общие сведения 249
однообмоточные 270
однополупериодные 250
основные соотношения 250
постоянная времени 265
статические параметры 263
характеристика управления 256
Муфты с электрическим управлением:
гистерезисные, основные соотношения 496, 497
— принцип действия 496
индукционные 484
Муфты электромагнитные ферропорошковые:
общие сведения 492
основные соотношения 493
характеристика 494
Муфты фрикционные:
динамика 490
основные соотношения 487
принцип действия 486
устройство 486, 489

Н

Нагрев аппаратов:
допустимые превышения температуры элементов 693
изолированных токоведущих частей 71
конвекция естественная 66, 68
— искусственная 68
коэффициент отдачи тепла при конвекции 67
— перегрузки по току при кратковременном режиме 79
— — — — — повторно-кратковременном режиме 81
— поверхностного эффекта 60
теплоотдачи 69
— эффекта близости 61
нагрев катушки 72, 73, 74
нагревостойкость изоляционных материалов 692
Ньютона уравнение 216
передача тепла излучением 68
— — конвекцией 66
переходный процесс без отдачи тепла 77, 82
— — охлаждения 78
— — при наличии теплоотдачи 75
постоянная времени нагрева 76
превышение температуры 69
— — при малом t/T 77
— — — коротком замыкании 82
— — — кратковременном режиме работы 78
продолжительность включения 81
расчет сечения проводника по длительному режиму 70
режим работы перемежающийся 79
— — повторно-кратковременный 80
результирующее термическое сопротивление цилиндрического проводника с изоляцией 72
Стефана—Больцмана уравнение 68
температуры распределение по радиусу катушки 74
температура частей аппарата при коротком замыкании 82
тепловой закон Ома 66
теплопроводность 65
— замещающего тела катушки 75
термическая стойкость 85

термическое сопротивление ряда плоских стенок 66
— — цилиндрического слоя изоляции 72
установившаяся температура аппарата 70, 76
фиктивное время нагрева 84
Фурье уравнение 64

О

Общие требования к электрическим аппаратам 10
Отделители и короткозамыкатели:
используемая схема релейной защиты и автоматики 617
конструкция 615
назначение и принцип действия 614
общие сведения 614

П

Пакетные выключатели и переключатели 502
Постоянные магниты:
общие сведения 240
оптимальная индукция 242
основные соотношения 241
поток в нейтральном сечении 243
— — рабочем зазоре 243
прямая возврата 243
старение 244
Потери:
в изоляции 64
в магнитопроводах аппаратов 63, 203
в неТоковедущих ферромагнитных частях 62
в токоведущих частях 62
поверхностный эффект 59
эффект близости 61
Предохранители:
испытательные токи плавких вставок низковольтных предохранителей 512
нагрев вставки при длительном режиме 505
— — и плавление при коротком замыкании 508
общие сведения 504
плавкая вставка 505, 508
пограничный ток 512
полное время отключения 509
предохранители-выключатели 517
токоограничивающие 510, 512

Предохранители низкого напряжения:
выбор по условиям пуска 518
— — — селективности 522
для защиты полупроводниковых приборов 515
конструкция 510

Пример расчета:
восстанавливающегося напряжения 181
динамической стойкости шин 57
нагрева токоведущих частей 86
электрических контактов 121

Р

Разрядники:
вентильные 633
вольт-секундная характеристика 630
магнитно-вентильные 637
остающееся напряжение 630
согласование характеристик разрядника и оборудования 630
трубчатые 631

Разъединители:
блокировка с выключателями 613
конструкция 608
контактная система 609
общие сведения 607
привод 610
с заземляющим ножом 611
схемы включения 607

Реакторы:
индуктивность 622
конструкция 623
нагрев 621
общие сведения 619
основные параметры 622, 624
расчетный ток динамической устойчивости 625

Реакторы:
сдвоенные 626
Резисторы:
конструкция 297
материалы 296
основные сведения 294
расчет 297
эквивалентный ток по нагреву 301
— — — теплу 301
Реле:
классификация 337
назначение 337
общие сведения 337
основные параметры 338
позисторная защита 360
Реле герконовые:
вибрация контактов 384
время срабатывания и отпускания 385
конструкция 386
поляризованные 388
расчет обмотки 399
сильноточные 397
с памятью 393
с постоянными магнитами 389
Реле времени:
моторные 376
общие сведения 369
с пневматическим замедлением 375
с электромагнитным замедлением 370
— — — схемы включения 371
— — — регулировка 372
— — — устройство 370
Реле поляризованные:
конструкция 351
контактная система 353
МДС срабатывания 352
преимущества 353
принцип действия 351
Реле тепловые:
влияние температуры окружающей среды 359
время-токовая характеристика 357
конструкция 360
принцип действия 355
Реле электромагнитные:
конструкция 346, 347, 349
коэффициент возврата 343
малогабаритные 353
общие сведения 337
регулировка 345, 347
согласование тяговых и противодействующих характеристик 341
Реостаты:
классификация 304
конструкция 305
Рубильники и переключатели 500

Т

Трансформаторы напряжения:
векторная диаграмма 667
зависимость погрешности от различных факторов 670
каскадные 675
компенсация погрешностей 671
конструкция 672
общие сведения 665
основные параметры 666
схемы включения 673
— замещения 668
Трансформаторы тока:
векторная диаграмма 643
зависимость погрешности от различных факторов 646
компенсация погрешностей 649
конструкция 659
общие сведения 640
основные параметры 641
работа при наличии апериодической составляющей в первичном токе 653
режим работы 651
схема включения 640

У

Условные обозначения электрических аппаратов и их элементов 12

Э

Электрическая дуга:
возвращающееся напряжение 144
восстанавливающееся напряжение при неудаленном коротком замыкании 146
— — на контактном промежутке при переменном токе 141

Электрическая дуга:
вольт-амперная характеристика динамическая 134, 187
— — статическая 130
время гашения дуги постоянного тока 133
гашение дуги переменного тока 137, 140
— — постоянного тока 130
критическая длина 132
общие сведения 123
отключение емкостных токов 154
— короткой дуги переменного тока 149
— малых индуктивных токов 152
— трехфазной цепи 144
— цепи с повышенной частотой тока 151
перенапряжения при отключении дуги постоянного тока 133
свойства дугового разряда 123
скорость восстановления напряжения 143
способы гашения в потоке сжатого воздуха 167
— — в трансформаторном масле 170
— — высоким давлением 166
— — с помощью полупроводниковых приборов 175
— — — — — электромагнитного дутья 158
энергия, выделяемая при гашении дуги постоянного тока 136
Электрический аппарат 5
Электрический контакт:
вибрация 95
включение 95
герметизированный 377
двухступенчатая контактная система 117
динамическая стойкость 100
жидкометаллические 118
зависимость переходного сопротивления от температуры 94
— температуры области стягивания от падения напряжения на контакте 92
износ при включении 102
— — размыкании 104
конструкция 110
напряжение плавления 94
— рекристаллизации 94
номограмма для выбора шунтирующего конденсатора и резистора 105
материалы 109
переходное сопротивление 90—92
превышение температуры в зоне стягивания 94
работа в замкнутом состоянии при номинальном токе 98
расчет нажатия сильноточных контактов 99
— — слаботочных контактов 99
схемы для уменьшения износа 104
температура максимальная контактной точки 93
Электродинамические усилия:
в витке 42
в контактах 46
в трехфазной системе 51
влияние формы сечения проводника 38
действующие на дугу в дугогасительной решетке 47
изгибающие моменты от электродинамических сил 40
между витками и катушками 44
— параллельными проводниками 35
— проводником и ферромагнитной стенкой 47
методы расчета 31
механический резонанс 55
направление действия 33
при наличии в токе апериодической составляющей 50
при однофазном переменном токе 48
расчетный ток динамической стойкости 54
усилия и моменты в сложных контурах 41
ударный ток 49
электродинамическая стойкость 54
Электромагниты:
броневая магнитная система 192

Электромагниты:
время срабатывания и отпускания 225, 228
динамика 224
замедление отпускания короткозамкнутой обмоткой 232
законы магнитной цепи 184
индуктивность обмотки магнитной системы без насыщения 190
клапанная магнитная система 183, 206
магнитная проводимость воздушных промежутков 187
магнитные материалы 210
обмотки 205
общие сведения 183
паразитный воздушный зазор 191, 193
пересчет обмоток с одного напряжения на другое 207, 210
потоки в магнитной системе без насыщения 190, 192
Электромагниты:
рабочий магнитный поток 184
рассеяния магнитный поток 184
расчет магнитной цепи 198
— силы тяги электромагнита постоянного тока 221
— — — — переменного тока 219
сила тяги броневой системы постоянного тока 218
сравнение тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока 223
удельные магнитные сопротивления стали на переменном токе 205
уменьшение вибрации якоря электромагнитов переменного тока 229
формула Максвелла для расчета силы тяги 215

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Часть первая 31

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Глава первая. Электродинамические усилия в электрических аппаратах 31
1.1. Общие сведения 31
1.2. Методы расчета электродинамических усилий . . . 31
1.3. Усилия между параллельными проводниками . . . 35
1.4. Усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники 38
1.5. Усилия в витке, катушке и между катушками . . . 42
1.6. Усилия в месте изменения сечения проводника . . . 46
1.7. Усилия при наличии ферромагнитных частей . . . 47
1.8. Электродинамические усилия при переменном токе. Динамическая стойкость аппаратов 48
1.9. Пример расчета динамической стойкости шин . . . 57

Глава вторая. Нагрев электрических аппаратов . . . 58
2.1. Общие сведения 58
2.2. Активные потери энергии в аппаратах 59
2.3. Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности 64
2.4. Установившийся режим нагрева 70
2.5. Нагрев аппаратов в переходных режимах 75
2.6. Нагрев аппаратов при коротком замыкании . . . 82
2.7. Допустимая температура различных частей электрических аппаратов. Термическая стойкость 85
2.8. Пример теплового расчета элементов аппаратов . . 86

Глава третья. Электрические контакты 88
3.1. Общие сведения 88
3.2. Режимы работы контактов 95
3.3. Материалы контактов 106
3.4. Конструкция твердометаллических контактов . . . 110
3.5. Жидкометаллические контакты 118
3.6. Примеры расчета контактов аппарата 121

Глава четвертая. **Отключение электрических цепей** . . 123
4.1. Общие сведения 123
4.2. Дуга постоянного тока 129
4.3. Дуга переменного тока при отключении активной нагрузки 137
4.4. Отключение индуктивной цепи переменного тока . . 140
4.5. Факторы, определяющие процесс восстановления напряжения 143
4.6. Отключение цепей при наличии шунтов 147
4.7. Отключение короткой дуги переменного тока . . . 149
4.8. Отключение цепей с повышенной частотой тока . . 151
4.9. Отключение малых индуктивных токов 152
4.10. Перенапряжения при коммутации конденсаторов и длинных линий 154
4.11. Способы гашения электрической дуги 157
4.12. Пример расчета скорости восстановления напряжения 181

Глава пятая. **Электромагниты** 183
5.1. Общие сведения о магнитных цепях аппаратов . . . 183
5.2. Магнитная цепь электромагнитов постоянного тока . 189
5.3. Магнитная цепь электромагнитов переменного тока . 199
5.4. Обмотки электромагнитов 205
5.5. Требования к материалам для магнитных цепей электромагнитов 210
5.6. Сила тяги электромагнитов 211
5.7. Динамика работы и время срабатывания электромагнитов 225
5.8. Магнитные цепи с постоянными магнитами 240

Глава шестая. **Магнитные усилители** 245
6.1. Общие сведения 245
6.2. Усилитель с самонасыщением (МУС) 249
6.3. Двухполупериодные схемы МУС 257
6.4. Параметры МУС 263
6.5. Влияние различных факторов на работу МУС . . . 267
6.6. Быстродействующие магнитные усилители (БМУ) . . 269
6.7. Реверсивные магнитные усилители 272
6.8. Бесконтактные магнитные реле на основе МУС . . . 275
6.9. Материалы магнитопроводов магнитных усилителей . 279

Часть вторая 282

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Глава седьмая. **Контроллеры, командоаппараты и реостаты** 282
7.1. Общие сведения 282
7.2. Контроллеры 282
7.3. Командоаппараты 286
7.4. Резисторы пусковых и пускорегулирующих реостатов . 294
7.5. Реостаты 304

Глава восьмая. **Контакторы и магнитные пускатели** . . 308
8.1. Общие сведения 308
8.2. Контакторы постоянного тока 313
8.3. Контакторы переменного тока 318

8.4. Магнитные пускатели 326
8.5. Тиристорный пускатель 331
8.6. Выбор контакторов и пускателей 334

Глава девятая. **Электромагнитные и тепловые реле** . . 337

9.1. Общие сведения 337
9.2. Электромагнитные реле тока и напряжения 341
9.3. Конструкция электромагнитных реле тока и напряжения 346
9.4. Поляризованные реле 351
9.5. Тепловые реле 355
9.6. Позисторная защита двигателей 360
9.7. Выбор реле 363

Глава десятая. **Электромеханические реле времени** . . 369

10.1. Общие сведения 369
10.2. Реле времени с электромагнитным замедлением . . 370
10.3. Реле времени с механическим замедлением . . . 375

Глава одиннадцатая. **Герконовые реле** 377

11.1. Общие сведения 377
11.2. Основные соотношения параметров герконового реле с обмоткой 381
11.3. Конструкция герконовых реле 386
11.4. Управление герконом с помощью постоянного магнита 389
11.5. Герконовые реле с памятью 393
11.6. Герконы с большой коммутационной способностью . 397
11.7. Расчет обмоток герконовых реле 399
11.8. Преимущества и недостатки герконов. Герконы, выпускаемые отечественной промышленностью 400

Глава двенадцатая. **Бесконтактные полупроводниковые электрические аппараты управления** 403

12.1. Релейный режим полупроводникового усилителя . . 403
12.2. Влияние параметров схемы на характеристики полупроводникового реле 412
12.3. Операционные усилители 415
12.4. Полупроводниковые реле 420
12.5. Применение оптоэлектронных приборов в электрических аппаратах 435
12.6. Логические элементы 436
12.7. Полупроводниковые транзисторные логические элементы 442
12.8. Полупроводниковые функциональные элементы . . 447
12.9. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства переменного тока (БКРПУ) 455
12.10. Микропроцессоры и электронные управляющие машины 461

Глава тринадцатая. **Датчики неэлектрических величин** . 466

13.1. Общие сведения 466
13.2. Контактные датчики 469
13.3. Бесконтактные датчики 473

Глава четырнадцатая. **Электромагнитные муфты управления** 484
14.1. Общие сведения 484
14.2. Электромагнитные фрикционные муфты 486
14.3. Электромагнитные ферропорошковые муфты . . . 492
14.4. Гистерезисные муфты 496

Часть третья 500

АППАРАТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Глава пятнадцатая. **Рубильники и переключатели** . . 500
15.1. Общие сведения 500
15.2. Конструкция рубильников и переключателей . . . 502

Глава шестнадцатая. **Предохранители** 504
16.1. Общие сведения 504
16.2. Нагрев плавкой вставки при длительной нагрузке . . 505
16.3. Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании . 508
16.4. Конструкция предохранителей низкого напряжения . . 510
16.5. Выбор предохранителей 518
16.6. Высоковольтные предохранители 526

Глава семнадцатая. **Автоматические воздушные выключатели (автоматы)** 531
17.1. Общие сведения 531
17.2. Токоведущая цепь и дугогасительная система автоматов 534
17.3. Приводы и механизмы универсальных и установочных автоматов 537
17.4. Расцепители автоматов 539
17.5. Универсальные и установочные автоматы 541
17.6. Быстродействующие автоматы 545
17.7. Автоматы для гашения магнитного поля мощных генераторов 548
17.8. Выбор автоматических выключателей 551

Глава восемнадцатая. **Выключатели переменного тока высокого напряжения** 552
18.1. Общие сведения 552
18.2. Баковые масляные выключатели 557
18.3. Маломасляные выключатели 562
18.4. Приводы масляных выключателей 568
18.5. Воздушные выключатели 576
18.6. Элегазовые выключатели 586
18.7. Электромагнитные выключатели 590
18.8. Вакуумные выключатели 593
18.9. Синхронизированные выключатели 598
18.10. Выключатели нагрузки 602
18.11. Выбор выключателей 605

Глава девятнадцатая. **Разъединители, отделители и короткозамыкатели** 607
19.1. Общие сведения 607
19.2. Конструкция разъединителей и их приводов . . . 608

19.3. Блокировка разъединителей и выключателей . . . 613
19.4. Отделители и короткозамыкатели 614

Глава двадцатая. Реакторы 619

20.1. Общие сведения 619
20.2. Конструкция реакторов 623
20.3. Сдвоенные реакторы 626

Глава двадцать первая. Разрядники 629

21.1. Общие сведения 629
21.2. Трубчатые разрядники 631
21.3. Вентильные разрядники 633
21.4. Разрядники постоянного тока 638
21.5. Ограничители перенапряжений 639

Глава двадцать вторая. Трансформаторы тока . . . 640

22.1. Общие сведения 640
22.2. Зависимость погрешностей от различных факторов . 643
22.3. Компенсация погрешности 649
22.4. Режимы работы трансформаторов тока 651
22.5. Конструкция трансформаторов тока 659
22.6. Выбор трансформаторов тока 664

Глава двадцать третья. Трансформаторы напряжения 665

23.1. Общие сведения 665
23.2. Конструкция трансформаторов напряжения . . . 672
23.3. Емкостные делители напряжения 677
23.4. Выбор трансформаторов напряжения 680

Глава двадцать четвертая. Комплектные распределительные устройства высокого напряжения 681

24.1. Общие сведения 681
24.2. Комплектные распределительные устройства на напряжение 6—35 кВ 682
24.3. Элегазовые комплектные распределительные устройства 689

Приложение 1
Нагревостойкость электроизоляционных материалов (по ГОСТ 8865-87) 692

Приложение 2
Допустимые превышения температуры элементов аппаратов низкого напряжения 693

Приложение 3
Допустимые температуры нагрева элементов высоковольтных электрических аппаратов 695

Приложение 4
Номинальные напряжения контакторов (ГОСТ 11206-77) 695

Приложение 5
Классы контакторов по допустимой частоте включений в час (ГОСТ 11206-77) 696

Приложение 6
Технические данные вакуумных контакторов 696
Приложение 7
Технические данные гибридных контакторов 696
Приложение 8
Технические данные главных контактов контакторов серии КТ-6000 и КТ-7000 697
Приложение 9
Технические данные по электромагнитам контакторов серии КТ-6000 и КТ-7000 697
Приложение 10
Технические параметры магнитных пускателей 698
Приложение 11
Автоматические воздушные выключатели серии А-3100 и А-3700 699
Приложение 12
Предел прочности $\sigma_{см}$ различных металлов на смятие . . 700
Список литературы 701
Предметный указатель 707

Учебник

ЧУНИХИН АЛЕКСАНДР АДОЛЬФОВИЧ

Электрические аппараты

Редактор И. Д. Беликов
Редактор издательства Н. Б. Фомичева
Художественный редактор В. А. Гозак-Хозак
Технический редактор Г. В. Преображенская
Корректор И. А. Володяева
ИБ № 2795

Сдано в набор 23.05.88. Подписано в печать 11.11.88. Т-20606. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 37,8. Усл. кр.-отт. 37,8. Уч.-изд. л. 39,95. Тираж 40 000 экз. Заказ № 90. Цена 1 р. 80 к.

Энергоатомиздат. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7