



А.Е.Сидоров
О.Ю. Маркин
Л.В. Долomanюк
В.В. Максимов
А.Н. Цветков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ



Учебное пособие

**А.Е.Сидоров
О.Ю. Маркин
Л.В. Долومانюк
В.В. Максимов
А.Н. Цветков**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Казань
2016

УДК 621.313

ББК 31.26

Э45

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический университет» *Кузнецов Б.В.*;

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетический университет» *Павлов П.П.*

Э45 Электрические и электронные аппараты: учебное пособие /
А.Е. Сидоров, О.Ю. Маркин, Л.В. Долomanюк и др. – Казань: Казан.
гос. энерг. ун-т, 2016. – 126 с.

В учебном пособии приведены сведения об электрических и электронных аппаратах, рассмотрены конструкции и процессы, происходящие при коммутациях. Также рассмотрены вопросы горения и способы гашения электрической дуги в предохранителях и автоматических выключателях.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по образовательной программе «Электроснабжение промышленных предприятий направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», при изучении следующих дисциплин: «Введение в специальность», «Электрические и электронные аппараты», «Электрооборудование промышленности», «Энергосиловое оборудование промышленных предприятий».

УДК 621.313

ББК 31.26

© Сидоров А.Е., Маркин О.Ю., Долomanюк Л.В., Максимов В.В,
Цветков А.Н., 2016

© Казанский государственный энергетический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТАХ	8
1.1. Виды и основные функции электрических аппаратов	8
1.2. Классификация электрических аппаратов	9
1.3. Требования, предъявленные к электрическим аппаратам	11
1.4. Особенности схем электроустановок и общие требования к их выполнению	14
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	17
2.1. Механический резонанс	17
2.2. Методы расчета электродинамических усилий.....	19
2.3. Расчёт динамической стойкости шин	22
ГЛАВА 3. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	24
3.1. Источники теплоты в электрических аппаратах.....	24
3.2. Анализ способов распространения теплоты в аппаратах.....	25
3.3. Режимы нагрева электрических аппаратов.....	27
3.4. Термическая стойкость электрических аппаратов.....	28
ГЛАВА 4. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	30
4.1. Физические процессы в контактах	30
4.2. Износ контактов	33
4.3. Материалы контактов	34
ГЛАВА 5. РАБОТА КОНТАКНОГО СОЕДИНЕНИЯ	38
5.1. Включение цепи	38
5.2. Работа контактов во включенном состоянии	38
5.3. Отключение цепи	38
5.4. Основные конструктивные исполнения контактных соединений	39
ГЛАВА 6. ГОРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ	47
6.1. Околоанодная область	48
6.2. Область дугового столба	51

ГЛАВА 7. СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ	53
7.1. Широкие и узкие продольные щели	53
7.2. Дугогасительные решётки	54
7.3. Гашение дуги высоким давлением	56
7.4. Гашение дуги в масле	56
7.5. Гашение дуги воздушным дутьём	58
7.6. Гашение дуги в элегазе	59
7.7. Гашение дуги в вакууме	59
7.8. Применение полупроводниковых приборов для облегчения гашения дуги	60
ГЛАВА 8. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ	61
8.1. Предохранители	61
8.2. Нагрев плавной вставки при длительной нагрузке	61
8.3. Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании.....	64
8.4. Конструкция предохранителей низкого напряжения	65
8.5. Высоковольтные предохранители	70
8.6. Выбор, применение и эксплуатация предохранителя для защиты электродвигателя и полупроводниковых устройств	72
ГЛАВА 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ	74
9.1. Назначение, классификация и область применения автоматов	74
9.2. Требования, предъявляемые к автоматам	75
9.3. Узлы автомата и принцип его действия	76
9.4. Основные параметры автомата	77
9.5. Универсальные и установочные автоматы	78
9.6. Быстродействующие автоматы	78
9.7. Автоматы для гашения магнитного поля мощных генераторов	79
9.8. Выбор, применение и эксплуатация автоматических воздушных выключателей	79
ГЛАВА 10. КОММУТАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ	82
10.1. Кнопки управления	82
10.2. Переключатели	83
10.3. Рубильники	84
10.4. Аппараты для коммутации цепей управления	86
10.5. Путевые (позиционные) выключатели (переключатели) и микро-выключатели	86
10.6. Командоконтроллеры	88

ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ	89
11.1. Электромагниты постоянного тока	90
11.2. Электромагниты переменного тока	93
ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ	95
12.1. Основные определения, классификация. Общие сведения	95
12.2. Электромеханические реле	97
12.3. Принцип действия и устройство электромагнитных реле	100
12.4. Требования, предъявляемые к реле	102
12.5. Реле напряжения, тока, промежуточные реле	102
12.6. Реле времени	105
12.7. Герконовые реле	107
ГЛАВА 13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	109
13.1. Назначение контакторов	109
13.2. Классификация контакторов	109
13.3. Область применения контакторов	110
13.4. Узлы контактора и принцип его действия; физические явления, происходящие в электрическом аппарате	110
13.5. Параметры контакторов	111
13.6. Контактная система.....	112
ГЛАВА 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	119
14.1. Режимы работы контакторов, физические явления, происходящие в электрических аппаратах	119
14.2. Контактторы постоянного тока, их конструкция и основные параметры	119
14.3. Контактторы серии КПВ-600	120
14.4. Контактторы типа КТПВ-600	121
14.5. Контактторы типа КМВ. Контактторы серии КП81	121
14.6. Выбор электрических аппаратов	122
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	123
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	125

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие написано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по образовательной программе «Электроснабжение промышленных предприятий» направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Оно также может быть полезно и для инженеров-электриков, работающих в области эксплуатации электрических аппаратов и электрооборудования промышленных предприятий, хозяйств и учреждений.

В учебном пособии использован следующий порядок изложения материала: общие сведения об электрических и электронных аппаратах, электродинамические усилия в электрических аппаратах, тепловые процессы в электрических аппаратах, контактные явления в электрических аппаратах, работа контактного соединения, горение электрической дуги, способы гашения электрической дуги, предохранители и автоматические выключатели, автоматические выключатели, коммутационные электрические аппараты низкого напряжения, электромагнитные механизмы, электромагнитные реле, электромагнитные контакторы переменного тока, электромагнитные контакторы постоянного тока.

При изложении материала главное внимание уделено основным вопросам теории и практики эксплуатации электрооборудования общего назначения. Кроме этого, в конце каждой главы предложены вопросы для самоконтроля.

В процессе изучения материала, изложенного в учебном пособии, у студента формируется:

- готовность к самостоятельной, индивидуальной работе, принятию решений в рамках своей профессиональной компетенции;
- способность и готовность анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;
- готовность участвовать в работе над проектами электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных их компонентов;
- способность рассчитывать режимы работы электроэнергетических установок различного назначения, определять состав оборудования и его параметры, схемы электроэнергетических объектов;

- готовность осуществлять оперативные изменения схем, режимов работы энергетических объектов;

- способность применять фундаментальные знания, полученные по общетехническим дисциплинам, к конкретным задачам проектирования и эксплуатации электрического хозяйства предприятий, организаций и учреждений;

- способность пользоваться технической и справочной литературой, материалами фирм-изготовителей для выбора современных технических решений при проектировании и эксплуатации электрического хозяйства;

- способность прорабатывать варианты проекта и проводить их технико-экономическое сравнение.

В данном учебном пособии авторы постарались максимально доступно изложить основные термины, используемые в процессе изучения таких дисциплин, как «Введение в специальность», «Электрические и электронные аппараты», «Электрооборудование промышленности», «Энергосиловое оборудование промышленных предприятий».

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТАХ

1.1. Виды и основные функции электрических аппаратов

Электрический аппарат (ЭА) – это электрическое устройство управления потоками энергии и информации, режимами работы, контроля и защиты технических систем и их компонентов.

ЭА осуществляют:

- включение и отключение электрических цепей объектов, принимающих участие в получении, преобразовании, передаче и распределении электрической энергии;
- контроль и измерение параметров указанных объектов;
- защиту объектов от несанкционированных режимов работы;
- управление технологическими процессами;
- регулирование (поддержание на неизменном уровне или изменение по определенному закону) параметров принимающих участие в получении, преобразовании, передаче и распределении электрической энергии;
- преобразование неэлектрических величин в электрические величины;
- создание магнитного поля с определенным параметром и направлением в заданном объеме.

Независимо от назначения, области применения, принципа действия, конструктивного исполнения все электрические аппараты разделяются на две большие группы:

1. Электромеханические (контактные).
2. Статические (бесконтактные, силовые электронные).

Основным признаком электромеханических аппаратов является контактная система с различными типами приводов, осуществляющая коммутацию электрической цепи. Приводы могут быть ручным, механическим, электромагнитным.

Процессы, протекающие в электромеханических ЭА, определяются различными многообразными физическими явлениями, которые изучаются в электродинамике, механике, термодинамике и других фундаментальных науках.

Характерные преимущества электромеханических аппаратов:

- более низкое значение сопротивления включенных электрических контактов по сравнению с сопротивлением большинства проводящих полупроводниковых ключей;

– практически идеальная гальваническая развязка между цепями управления и силовой частью, а также между разомкнутыми силовыми цепями;

– работоспособность при более высоких значениях температуры и радиации окружающей среды.

Благодаря этим преимуществам во многих областях техники предпочтительно использовать электромеханические ЭА коммутации по сравнению со статическими аппаратами.

Наличие подвижных механических частей, явление искрообразования и дугообразования при коммутации, ограниченное быстродействие и другие негативные факторы, присущие этой группе ЭА, инициировали работы по созданию статических ЭА. Первыми были дроссели насыщения, магнитные усилители, регуляторы, статические реле.

Освоение промышленностью мощных биполярных, а затем полевых транзисторов и тиристоров обусловило, начиная с 60-х годов 20 века, создание различных типов быстродействующих статических ЭА.

Статические ЭА выполняются на основании полупроводниковых приборов или в сочетании последних с управляемыми магнитными усилителями или магнитным ключом.

Принцип действия большинства статических электронных аппаратов основан на изменении проводимости входящих в них управляемых нелинейных элементов. При этом диапазон изменения проводимости может быть очень широким. Широкий диапазон изменения магнитной проводимости, имеют также и магнитные ключи.

Изменение проводимости статических ЭА, в свою очередь, дает возможность управлять потоками электрической энергии. Проводимость может изменяться непрерывно или дискретно. Дискретное (или импульсивное) управление является более предпочтительным, так как позволяет реализовывать более высокие технико-экономические характеристики ЭА, в частности, получить существенно лучшее значение КПД. Поэтому в современных статических ЭА исполнительные органы работают в ключевом режиме.

1.2. Классификация электрических аппаратов

Для коммутационных аппаратов общим стандартом является ГОСТ 17703-72 «Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия» [2].

Для других групп аппаратов обобщающих стандартов нет, имеются частные стандарты, а также отраслевой каталог [5] («Электротехника СССР: Отраслевой каталог» 1986).

Классификация ЭА может быть проведена по ряду признаков:

- назначению (основной выполняемой функции),
- области применения,
- принципу действия,
- роду тока, исполнению защиты от воздействия окружающей среды,
- конструктивным особенностям и др.

Основной является классификация *по назначению*, которая предусматривает разделение ЭА на следующие группы:

1. Коммутационные аппараты распределительных устройств, служащие для включения и отключения электрических цепей. Согласно ГОСТ 17703-72 [2], к ним относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатель нагрузки, выключатели, выключатели нагрузки, разъединители, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели и предохранители. Для аппаратов этой группы характерно сравнительно редкое их включение-отключение.

2. Токоограничивающие аппараты, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжения (разрядники). Режим короткого замыкания и перенапряжения являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшим нагрузкам.

3. Пускорегулирующие аппараты предназначены для пуска, регулирования частоты вращения и тока электрических машин. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы и реостаты. Для аппаратов этой группы характерно частые включения и отключения, их число достигает 3600 в час и более.

4. Аппараты для контроля заданных электрических и неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики. Для реле характерно плавное изменение входной (контролируемой) величины, вызывающее скачкообразное изменение выходного сигнала. Входной сигнал обычно воздействует на схему автоматически. В датчиках непрерывное изменение входного сигнала преобразуется в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Это изменение 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 стандартные значения, удобные для измерения. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.

6. Электрические регуляторы. Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону его изменения. В частности, такие аппараты служат для поддержки на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин.

Разделение аппаратов *по области применения* более условно. Аппараты для электрических систем и электроснабжения объединяют в группу аппаратов – распределительных устройств (РУ) низкого напряжения 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 РУ, так и к группе аппаратов управления, например, рубильники, пакетные выключатели, контакторы, трансформаторы тока и др.

В пределах одной группы или типа аппараты различаются:

по номинальному напряжению – аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением свыше 1000 В);

по роду тока – постоянного тока, переменного тока промышленной частоты, переменного тока повышенной частоты;

по роду защиты от окружающей среды – в открытом, защищенном, брызгозащищенном, воздухозащищенном, герметичном, взрывобезопасном исполнении и т.д.;

по способу действия – электромагнитные, магнитоэлектрические, индуктивные, тепловые и т.д.;

по ряду других факторов (быстродействие, способы гашения дуги и т.п.).

1.3. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам

Многообразие конструктивных разновидностей современных электрических аппаратов формирует различные требования, предъявляемые к ним. Однако существуют и некоторые общие требования вне зависимости от назначения, применения или конструкции аппаратов.

1. Нагревание всех без исключения аппаратов должно иметь место в пределах норм, установленных ГОСТом [2]. При этом, так как предел нагревания, прежде всего, определяется электрической изоляцией токоведущих частей аппаратов, изолирующие материалы должны быть выбраны с надлежащим уровнем теплостойкости. Кроме того, нагревание аппарата ограничивает также контактная часть.

2. При номинальном режиме работы температура токоведущих элементов аппарата не должна превосходить паспортных значений.

3. При коротком замыкании (КЗ) токоведущие элементы подвергаются значительным термическим и динамическим нагрузкам, вызываемым большим током. Эти нагрузки не должны вызывать остаточных явлений, нарушающих работоспособность аппарата при устранении КЗ.

4. Контакты аппаратов, предназначенных для отключения токов КЗ, должны быть рассчитаны на этот режим КЗ.

5. Аппараты, предназначенные для частных включений и выключений, должны иметь высокую износостойкость и быстродействие.

6. Изоляция электрических аппаратов должна выдерживать возможные перенапряжения.

7. Высокая надежность аппаратов, безотказность в работе.

8. Высокая чувствительность.

9. Экономичность (малогабаритность, наименьший вес аппарата, минимальное количество дорогостоящих материалов для изготовления отдельных частей).

10. Малое собственное потребление энергии.

11. Простота устройства и обслуживания аппаратов.

12. Удобство монтажа и эксплуатации, минимальная потребность в уходе.

1.3.1. Условия работы современной аппаратуры

ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия» [7] предъявляет следующие требования по устойчивости к внешним воздействиям:

1. Высота над уровнем моря не более 2000 м.

2. Температура окружающей среды от - 40 до + 40 °С.

3. Относительная влажность воздуха не более 90 % при 20 °С.

4. Отсутствие непосредственного воздействия солнечной радиации.

5. Окружающая среда невзрывоопасна, не содержит агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию.

6. При ударных нагрузках с ускорением до 5g общепромышленное исполнение и для экспорта странах с умеренным тропическим климатом.

Под климатическим фактором внешней среды понимается температура и влажность окружающего воздуха, давление воздуха (высота над уровнем моря), солнечное излучение, дождь, ветер, пыль, солевой туман, гидростатическое давление воды.

1.3.2. Номинальные параметры электрических аппаратов

ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия» [7] регламентирует требования к электрическим параметрам и режимам аппаратов:

1. Номинальные напряжения переменного тока: U_{\sim} 36; 127; 220; 380; 660 В.
2. Номинальные напряжения постоянного тока: $U_{=}$ 24; 48; 110; 220; 440; 750 В.
3. Уровни номинальных токов: $I_H = 1; 3; 6; 10; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300$ А.
4. Продолжительность включения в повторно-кратковременном режиме работы: ПКР-ПВ % = 15; 25; 40; 60%.
5. Кратковременный режим – стандартные значения продолжительности перехода нагрузки в кратковременном режиме: 10; 30; 60; 90 мин.
6. Максимально допустимые частоты включения в час: 6; 30; 150; 600; 1200; 2400; 3600.

1.3.3. Основные материалы, применяемые в аппаратостроении

В аппаратостроении применяется широкий спектр материалов различного назначения [6].

1. Проводниковые – медь, сталь, алюминий, латунь.
2. Магнитные – различного рода стали и сплавы для магнитопроводов (магнитотвердые, магнитомягкие)
3. Сплавы высокого сопротивления – для изготовления различных сопротивлений (вольфрам, фехраль, мангенин).
4. Дугостойкие изоляционные материалы – асбест, керамика, пластмасса для дугогасительных камер.
5. Контактные материалы – золото, серебро, платина, медь, металлокерамика для обеспечения высокой электрической износостойчивости контактов.
6. Биметаллы – применяются в ЭА, использующих линейные удлинения тел нагреваемым током.
7. Конструкционные материалы – металлы, пластмасса для придания аппарату и его деталям тех или иных форм и для изготовления деталей, преимущественным назначением которых является передача и восприятие механических усилий.

1.4. Особенности схем электроустановок и общие требования к их выполнению

Как известно, процессы получения, преобразования, передачи и потребления электроэнергии происходят в электрических цепях электроустановок и электрических устройств. Поэтому основным средством изображения электроустановок и аппаратов служат схемы электрические принципиальные. На них показаны соответствующие цепи. Наиболее важными являются принципиальные схемы, позволяющие понять взаимодействие всех элементов электроустановок.

Наряду с несложными электрическими схемами с одной или несколькими электрическими цепями и небольшим количеством элементов (например, схема освещения с несколькими светильниками, схема управления электродвигателями) во многих случаях выполняются схемы (дистанционного управления, телемеханики, релейной защиты и автоматики), содержащие десятки цепей и соответствующее множество элементов. В простых схемах, зная смысл условных графических обозначений отдельных элементов и связей между ними, разобраться нетрудно, но для чтения сложных схем этих знаний недостаточно, так как на них дополнительно проставляются буквенно-цифровые обозначения, указывающие вид и порядковый номер каждого элемента, а также различные обозначения (буквами, цифрами, буквами и цифрами) цепей и их участков.

Особенностью схем электроустановок является использование в них условно-графических обозначений, применяемых в схемах других видов.

Кроме того, при выполнении электрических схем отдельные элементы одного и того же устройства (например, обмотки и контакты реле, обмотки тока и напряжения ваттметров и счетчиков, магнитных усилителей) разносят по разным цепям, иногда находящимся на разных чертежах. Этим обусловлена необходимость выполнения чертежей двумя разными способами: совмещенным и разнесенным. Второй способ преимущественно применяется при выполнении управления и контроля силовым электрооборудованием.

1.4.1. Основные правила выполнения схем

Правила выполнения и оформления схем регламентируют стандарты седьмой классификационной группы ЕСКД. Виды и типы схем, общие требования к их выполнению должны соответствовать ГОСТ 2.701-84 «ЕСКД.

Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению». Правила выполнения всех типов электрических схем – ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. «Правила выполнения электрических схем». При выполнении электрических схем цифровой вычислительной техники руководствуются правилами ГОСТ 2.709-81 ЕСКД. «Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники». Обозначение цепей в электросхемах выполняют по ГОСТ 2.709-72 ЕСКД. «Система обозначений цепей в электрических схемах», буквенно-цифровые обозначения в электрических схемах – по ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах». Обобщив вышеуказанные стандарты, можно вывести следующие основные правила оформления:

1. Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей установки в основном не учитывается; расположение графических элементов схемы определяется лишь удобством чтения схемы.

2. На принципиальной схеме изображаются все электрические элементы и все электрические связи между ними. Всем элементам одного и того же аппарата присваивается общая, только им присущая, буквенно-цифровая маркировка. В некоторых случаях после обозначения элемента проставляется его номер.

3. Схема изображается в отключенном состоянии, когда катушки не обтекаются током, а кнопки, пружины и т.п. опущены. В соответствии с этим все имеющиеся в схеме контакты делят на:

- замыкающие (при обесточенной катушке контакты разомкнуты);
- размыкающие (при обесточенной катушке контакты замкнуты).

Силовые цепи на схеме вычерчиваются жирными линиями, а цепи управления – более тонкими.

4. Элементы и устройства изображаются на схемах совмещенным или разнесенным способом; в первом случае – в непосредственной близости друг к другу; во втором – в разных местах схемы.

5. Схемы выполняются в многолинейном или однолинейном изображении.

6. Каждый элемент, изображенный на схеме, должен иметь порядковый номер в пределах группы элементов, которым на схеме присвоены одинаковые буквенные обозначения, позиционные обозначения проставляются на схеме рядом с условным графическим обозначением с правой стороны или над ним.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электрического и электронного аппарата.
2. По каким признакам классифицируются электрические аппараты?
3. Каково расположение электрических и электронных аппаратов в установке по производству, распределению и потреблению электрической энергии?
4. Каковы требования, предъявляемые к электрическим и электронным аппаратам?
5. Изложите особенности схем электроустановок и общие требования к их выполнению.

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

При взаимодействии токов КЗ 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.

Механическая прочность элементов конструкций электрических аппаратов зависит от значения ЭДУ, его направления, длительности воздействия и крутизны нарастания.

Под **электродинамической стойкостью** электрических аппаратов понимается способность выдерживать без повреждений и нарушений функционального состояния механические воздействия, создаваемые протекающими через него токами.

Количественной характеристикой электродинамической стойкости является ток электродинамической стойкости. Эта величина может быть либо непосредственно амплитудным значением тока КЗ – ударным током КЗ – $i_{\text{дин}}$, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока:

$$K_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2}I_{\text{н}}}. \quad (2.1)$$

2.1. Механический резонанс

Всякая механическая упругая система имеет собственную частоту колебаний. Частота колебаний системы около своего положения равновесия называется собственной частотой колебания. Скорость их затухания зависит от упругих свойств и массы системы и ее деталей, а также сил трения и не зависит от величины силы, вызывающей колебания. Под действием переменных ЭДУ токоведущие части электроаппаратов испытывают вибрацию.

Совпадение частоты собственных колебаний с частотой изменения ЭДУ называется *механическим резонансом*, который может быть полным и неполным.

Полный резонанс наблюдается при точном совпадении частоты колебаний ЭДУ с частотой собственных колебаний конструкции и равных положительных и отрицательных амплитуд.

Частичный резонанс – при неполном совпадении частот и неравных амплитудах.

Во избежание механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний отличалась от частоты ЭДУ, причем лучше, когда частота собственных колебаний лежит ниже частоты ЭДУ.

Например, если частота собственных колебаний шин < 200 Гц, то собственная частота колебаний приближается к частоте ЭДУ (50–100 Гц). При этом значения ЭДУ, действующего на проводники, увеличивается в десятки раз. При конструировании стремятся исключить возможность резонанса за счет выбора длины свободного пролета шин. Гибкое крепление шин снижает собственную частоту колебаний. Конструкции шин следует выполнять с запасом по механической прочности.

На основе известного **правила левой руки** можно сделать выводы:

– при расположении проводников в одной плоскости ЭДУ расположены в этой же плоскости, а индукция – в плоскости, перпендикулярной расположению проводников;

– при одинаковом направлении тока в параллельных проводниках усилия притягиваются друг к другу, а при противоположном направлении токов в них – отталкиваются друг от друга (рис. 2.1);

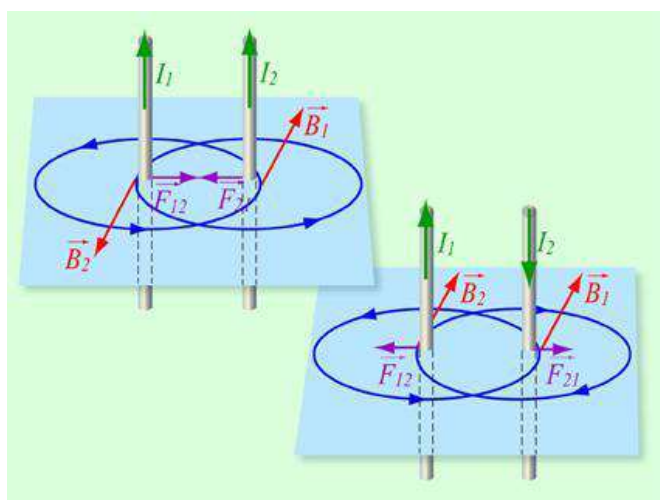


Рис. 2.1. Направление движения ЭДУ в зависимости направления токов

– при непараллельных прямоугольных проводниках необходимо продолжить их оси до пересечения друг с другом. Если в образовавшемся при этом угле ток переходит из одного проводника в другой через вершину угла, то ЭДУ стремится расширить угол, образованный осями проводников. Если же токи в сторонах угла направлены встречно друг другу, т.е. сходятся в вершине угла или расходятся из нее, то ЭДУ стремится уменьшить угол, а проводники сблизятся (рис. 2.2).

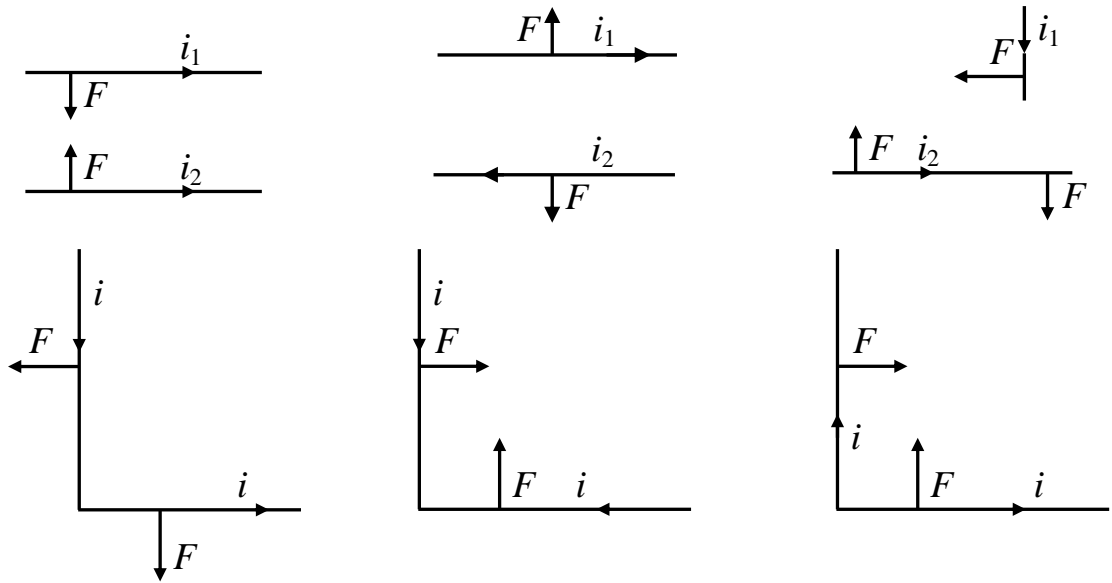


Рис. 2.2. Влияние направления токов на геометрию движения проводников

Правило «левой руки». За направление dl принимается направление тока в проводнике (вытянутые четыре пальца). Направление индукции B , создаваемой другим проводником, определяется по правилу буравчика (ладонь) (рис. 2.3).

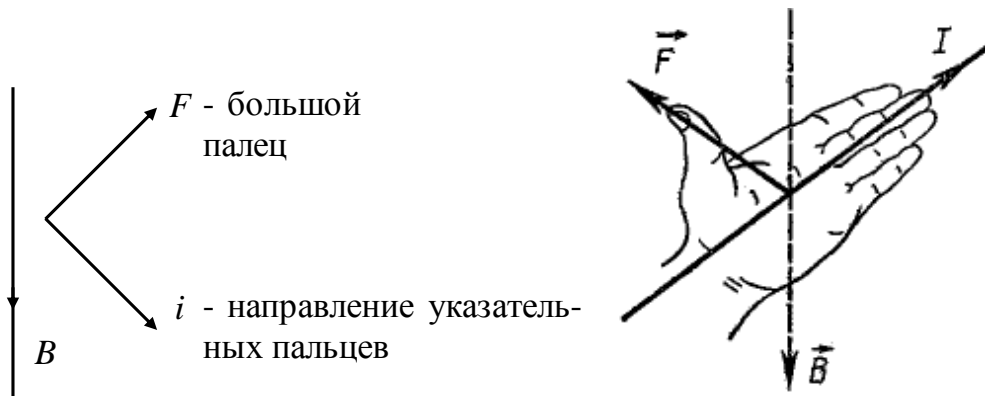


Рис. 2.3. Направление усилия F – по правилу левой руки

2.2. Методы расчета электродинамических усилий в электрических аппаратах

Для расчета электродинамических усилий (ЭДУ) используются два метода.

1. Закон Био-Савара-Лапласа, где ЭДУ определяется как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера [9]. Этот метод (рис. 2.4) целесообразно применять в тех случаях,

когда рассматриваемый токоведущий контур состоит из проводников более или менее простой по конфигурации.

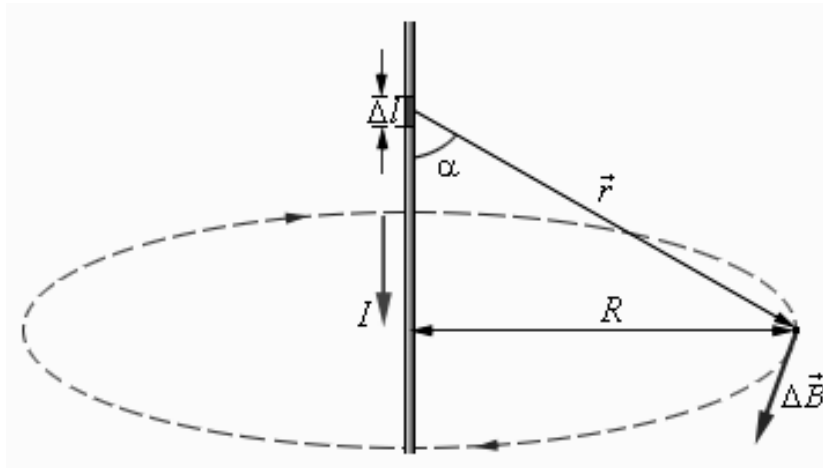


Рис. 2.4. Определение ЭДУ как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля

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

Проинтегрируем усилие F по длине проводника (рис. 2.4) и получим

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l B \cdot i \cdot \sin \beta \cdot dl, \quad (2.2)$$

где B – индукция, i – ток, l – длина проводника, β – угол между векторами dl и B .

Для оценки электродинамической стойкости токоведущих частей в настоящее время используют два метода определения значений ЭДУ.

2. Второй метод (метод энергетического баланса) основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током [9]

$$K_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2I_{\text{н}}}}. \quad (2.1)$$

$$F = \frac{dW}{dx} > 0, \quad (2.3)$$

$$W = \left(\frac{1}{2}\right)L_1 \cdot i_1^2 + \left(\frac{1}{2}\right)L_2 \cdot i_2^2 + Mi_1 \cdot i_2, \quad (2.4)$$

где W – электромагнитная энергия; x – возможное перемещение в направлении действия усилия; L_1 и L_2 – индуктивности контуров; i_1 и i_2 – токи, протекающие в них; M – взаимная индукция.

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

Обычно усилие F направлено так, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала. Первые два члена определяют энергию независимых контуров, а третий член определяет энергию, обусловленную их магнитной связью. Круглая и кольцевая форма сечения проводника не влияют на величину ЭДУ, так как магнитные силовые линии вокруг проводников и в этом случае представляют собой окружность, и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника.

На переменном токе имеют место два явления:

- поверхностный эффект (рис. 2.5);
- эффект близости (рис. 2.6).

Суть поверхностного эффекта сводится к изменению распределения тока по сечению проводника, что не нарушает его симметрии относительно геометрической оси, и, следовательно, не влияет на величину ЭДУ.

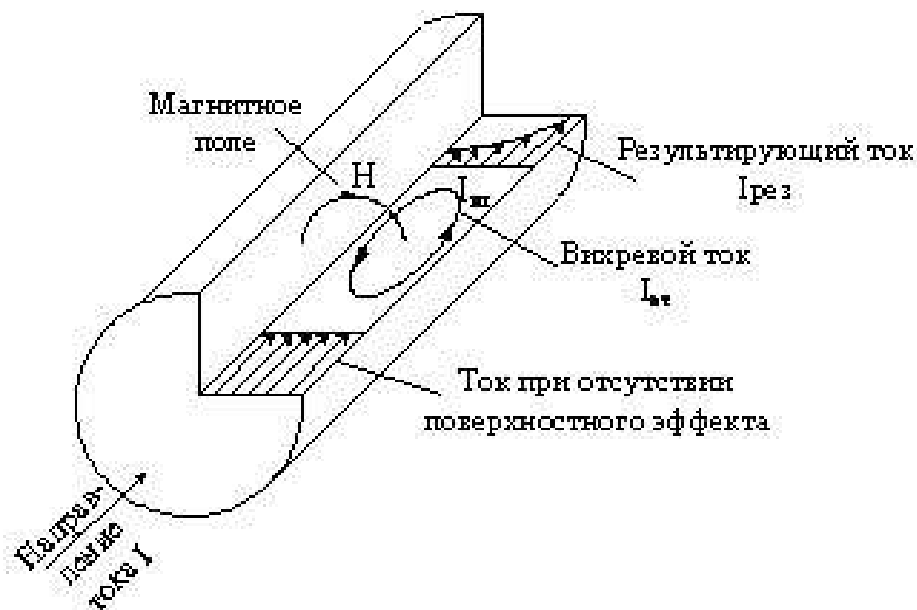


Рис. 2.5. Поверхностный эффект

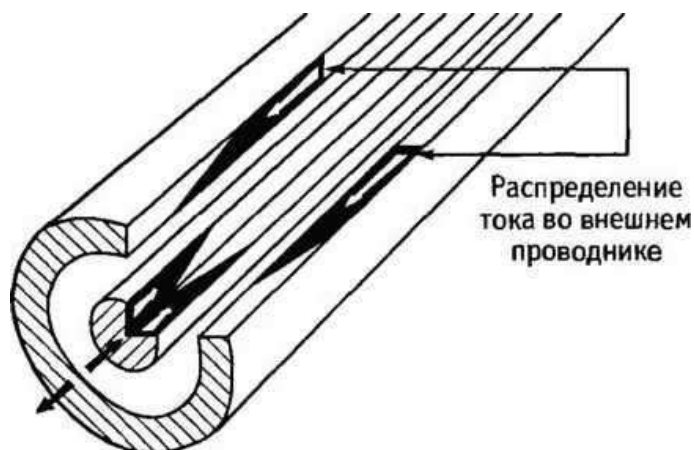


Рис. 2.6. Эффект близости

Эффект близости приводит к нарушению симметричного распределения тока по сечению, что ведет к изменению величины ЭДУ, увеличивая его при согласных и уменьшая при встречных токах. Это имеет место как в круглых, так и проводниках прямоугольной формы.

При прямоугольной форме сечения проводника его размеры влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии около проводников являются не окружностями, а овалами.

Шина, расположенная плашмя, имеет больше ЭДУ, чем при ее расположении на ребро. Хотя прочность выше при размещении шины плашмя.

2.3 Расчёт динамической стойкости шин

Механический резонанс возникает в результате появления резонанса между гармонически меняющейся электродинамической силой и собственными механическими колебаниями деталей токоведущей цепи аппарата. В случае, когда частота переменной составляющей силы близка к собственной частоте механических колебаний, аппарат может разрушиться вследствие явления резонанса. Для шин прямоугольного и круглого сечения эту частоту можно определить приближённо:

$$f = \frac{k}{i^2} \sqrt{\frac{EJ}{vgq}}, \quad (2.5)$$

где v – плотность материала шины; g – ускорение свободного падения; i – пролет между изоляторами; E – модуль упругости материала шин; J – момент инерции сечения шины; q – сечение шины; k – коэффициент, зависящий от характера крепления шин.

К шине, как к балке, закреплённой на концах, прикладываются максимальные расчётные усилия, находясь в ней механические напряжения и усилия, действующие на изоляторы.

Максимальное механическое напряжение в шине, Па

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{F_{\phi \max} l^2}{12W} \quad (2.6)$$

где M – максимальный изгибающий момент, Нм; W – момент сопротивления, м³; l – длина свободного пролёта шины, м; $F_{\phi \max}$ – наибольшее значение удельной электродинамической нагрузки от соседней фазы, Н/м.

Нагрузка на изолятор

$$F_{из} = F_{\phi \max} l \quad (2.7)$$

Прочность изолятора проверяется неравенством

$$F_{из} \leq 0,6 \cdot F_{\text{разр}} \cdot \frac{H}{H^*}, \quad (2.8)$$

где $F_{\text{разр}}$ – минимальное разрушающее усилие, допустимое для изолятора, Н (выбирается из справочника [4]); H – высота изолятора, м; H^* – расстояние от основания изолятора до центра тяжести поперечного сечения шины, м.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электродинамической стойкости электрического аппарата.
2. Каков принцип определения модуля электродинамических сил с помощью закона Ампера?
3. В чем состоит принцип определения модуля электродинамических сил по изменению запаса магнитной энергии токоведущего контура?
4. Как определяется направление вектора электродинамической силы?
5. Охарактеризуйте электродинамические силы между параллельными проводниками бесконечной длины.
6. Охарактеризуйте электродинамические силы между проводниками, расположенными под прямым углом.
7. Опишите механический резонанс.

ГЛАВА 3. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

3.1. Источники теплоты в электрических аппаратах

ЭА являются сложными электротехническими устройствами, содержащими много элементов, одни из которых являются проводниками электрических токов, другие – проводниками магнитных потоков, а третьи служат для электрической изоляции. Часть элементов может перемещаться в пространстве, передавая усилия другим узлам и блокам.

Работа большей части аппаратов связана с преобразованием одних видов энергии в другие. При этом, как известно, неизбежны потери энергии и превращение ее в тепло.

При протекании тока по электрическому проводнику в нем выделяется мощность

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \rho \frac{l}{S}, \quad (3.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·мм²/м; l – длина проводника, м; S – площадь сечения проводника, м².

Удельное электрическое сопротивление материала проводника зависит от температуры θ и в большинстве случаев (до температуры 150–200 °С) вычисляется

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \theta), \quad (3.2)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при $\theta = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

При работе на переменном токе проявляется поверхностный эффект. Это явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника. Оно приводит к возникновению дополнительных, по сравнению с постоянным током, потерь мощности, которые учитываются коэффициентом поверхностного эффекта

$$K_{\Pi} \geq 1.$$

Установлено [3], что этот коэффициент для немагнитных проводников зависит от формы и геометрических размеров проводника. С ростом частоты и уменьшением удельного сопротивления проводника поверхностный эффект проявляется сильнее. Чем больше диаметр проводника, тем больше поверхностный эффект.

Эффект близости – явление неравномерного распределения плотности тока (переменного), обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами. Коэффициент близости K_{σ} также, как и K_{Π} зависит от геометрических размеров, формы проводников и δ_1 расстояния между ними. В отличие от K_{Π} , K_{σ} может принимать различные значения или быть равным единице.

Таким образом:

$$P = K_{\Pi} K_{\sigma} I^2 R. \quad (3.3)$$

Эффект близости усиливается с ростом частоты, электропроводности, зависит от взаимного расположения проводников, их формы и направления токов в них. Чем ближе проводники друг к другу, тем больше эффект близости.

В проводниках из *ферромагнитных материалов* явления поверхностного эффекта и эффекта близости проявляются значительно сильнее и коэффициенты K_{Π} и K_{δ} в этих случаях существенно больше, чем в немагнитных проводниках.

3.2. Анализ способов распространения теплоты в электрических аппаратах

Различают три способа распространения теплоты в пространстве – теплопроводность, тепловое излучение, конвекция (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Распространение теплоты в пространстве

Теплопроводность (conduction) – распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру.

В соответствии с гипотезой Фурье, количество теплоты d^2Q проходящее через элементарную площадку изотермической поверхности dS за промежуток времени dt определяется как

$$d^2Q = -n_0 \lambda \frac{d\theta}{dn} dS \cdot dt, \quad (3.4)$$

где λ – теплопроводность; n_0 – единичный вектор нормали к площадке dS ; $(d\theta)/dn$ – температурный градиент.

Отрицательный знак обусловлен тем, что тепло распространяется от точек с большей температурой к точкам с малой температурой, то есть противоположно градиенту температуры.

Изотермическая поверхность – это такая поверхность, где все точки имеют одинаковую температуру.

Для большинства веществ в определенном диапазоне температуры теплопроводность зависит от температуры линейно, то есть

$$\lambda = \lambda_0 [1 + \beta(\theta - \theta_0)], \quad (3.5)$$

где λ_0 – теплопроводность при $\theta = \theta_0$; β – температурный коэффициент теплопроводности.

Тепловой закон Ома

$$\Delta\theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda S} = \Phi \cdot R_T, \quad (3.6)$$

где $\Phi = \Phi_0 \cdot S$; δ – длина пути потока Φ ; R_T – термическое сопротивление.

Тепловое излучение (radiation) – распространение внутренней энергии тела путем электромагнитных волн. Совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел называют теплообменным излучением, лучеиспусканием или радиацией.

В общем случае плотность собственного излучения подчиняется закону Стефана-Больцмана:

$$P = 5,67 \cdot \varepsilon \frac{T^4}{100^4}, \quad (3.7)$$

где P – плотность теплового потока; ε – коэффициент излучения тепла ($0 \leq \varepsilon \leq 1$); T – температура, °К.

Тепло, отдаваемое телом при тепловом излучении, зависит от четверной степени абсолютной температуры нагретой поверхности.

Конвекция (convection) – распространение теплоты при перемещении объемов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

Различают естественную и вынужденную конвекцию. При естественной конвекции движение происходит за счет выталкивающих (Архимедовых) сил, возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих частиц жидкости или газа. При вынужденной конвекции жидкость или газ движется за счет внешних сил (под действием насоса, вентилятора). Охлаждение – воздушное, водяное. Движение – ламинарное (параллельно стени канала), турбулентное (хаотическое, неупорядочное). Лучшая отдача тепла – от труб с жидкостью при ее турбулентном движении.

$$P = K_T \cdot S_{\text{охл}} (\theta - \theta_0), \quad (3.8)$$

где K_T – коэффициент теплоотдачи – определяется эмпирически. Он зависит от многих факторов, в том числе:

- температуры, вязкости и плотности окружающей среды;
- скорости вынужденного движения среды;
- формы охлаждаемой поверхности и ее расположения относительно потока охлаждающей среды;
- температуры охлаждаемой поверхности.

3.3. Режимы нагрева электрических аппаратов

При эксплуатации ЭА могут иметь место следующие режимы работы:

- продолжительный, при котором, температура аппарата достигает установившегося значения, и аппарат при этой температуре остается под нагрузкой сколь угодно длительное время;
- прерывисто-продолжительный, при котором аппарат остается под нагрузкой при установившемся значении температуры ограниченное техническими условиями время;

– повторно-кратковременный, при котором температура частей ЭА за время нагрузки не достигает установившегося значения, а за время паузы не достигает температуры холодного состояния;

– кратковременный, при котором в период нагрузки температура частей ЭА достигает установившегося значения, а в период отсутствия нагрузки достигает температуры холодного состояния;

– короткое замыкание; это частный случай кратковременного режима работы, когда температура частей ЭА значительно превосходит установившуюся температуру при нормальном режиме работы.

Возможно три режима работы аппарата.

Первый характеризуется постоянством подводимой к нему мощности

$$P = I_0^2 \cdot R_0 = \text{const}. \quad (3.9)$$

Этот случай встречается при последовательном включении аппарата в цепь и малом изменении его сопротивления R_0 с ростом температуры.

При **втором** режиме ток, проходящий 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 части аппарата изменяется, тогда мощность, подводимая к аппарату будет

$$P = I_0^2 \cdot R = I_0^2 \cdot R_0(1 + \alpha_R \theta) = I_0^2 \cdot R_0[1 + \alpha_R(\theta + \tau)] \quad (3.10)$$

При **третьем** режиме обмотка аппарата подключена к напряжению и источнику бесконечной мощности. Обычно так включается катушка реле напряжения и контактов. В этом случае

$$P = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha_R \theta)} = \frac{U^2}{R_0[1 + \alpha_R(\theta + \tau)]}, \quad \tau = \theta - \theta_0. \quad (3.11)$$

3.4. Термическая стойкость электрических аппаратов

Это способность ЭА выдерживать без повреждений, препятствующих дальнейшей работы, термическое воздействие протекающих по токоведущим частям токов заданной длительности.

Количественной характеристикой термической стойкости является ток термической стойкости, протекающий в течение определенного промежутка времени.

Термическая стойкость ЭА зависит не только от режима КЗ, но и от теплового состояния, предшествующего этому режиму.

Для большинства ЭА время протекания КЗ $t \leq 0,1 T$, то есть не превосходит времени нагрева при адиабатическом процессе (нагрев без теплообмена с окружающей средой).

Другими словами, режим КЗ можно рассматривать как кратковременный режим работы, при котором температура ЭА может достигать значений, превосходящих допустимую температуру в продолжительном режиме.

Существуют ограничения, которые в основном диктуются температурой рекристаллизации материала токоведущих частей. В электроаппаратах высокого напряжения приняты следующие значения максимальной температуры при кратковременном режиме работы [10]:

- неизолированных токоведущих частей из меди или ее сплавов – 300 °С;
- алюминиевых токоведущих частей – 200 °С;
- токоведущих частей (кроме алюминиевых), соприкасающихся с ограниченной изоляцией или маслом – 250 °С.

Расчетные времена КЗ стандартизированы и приняты равными 10; 5; 1 с. В соответствии с этими временами и токи термической стойкости носят название 10 секундный, 5 секундный и 1-секундный ток термической стойкости соответственно, то есть $I_1^2 = 5I_5^2 = 10I_{10}^2$ – формула пересчета токов термической стойкости. ГОСТ 20248-82 (от 2006 г.) – $\theta_0 = 40$ °С. Если $\theta_0 > 40$ °С, необходим пересчет

$$I_{\text{осн}} = I_{\text{н}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_0}{\theta_{\text{доп}} - 40 \text{ °С}}}.$$

Если $\theta_0 < 40$ °С – токовую нагрузку можно увеличить.

Контрольные вопросы

1. Опишите явление поверхностного эффекта.
2. Опишите явление эффекта близости.
3. Опишите потери в нетоковедущих ферромагнитных частях аппарата.
4. Опишите потери в изоляции аппаратов из-за токов проводимости.
5. Опишите перемежающийся и повторно-кратковременный режимы работы.
6. Охарактеризуйте нагрев аппарата при коротком замыкании.

ГЛАВА 4. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

4.1. Физические процессы в контактах

Контактная система является одной из наиболее существенных частей электроаппарата, от надежной работы которой существенно зависит работоспособность всего аппарата.

Электрический контакт – это сопротивление тел, обеспечивающее протекание тока в электрической цепи.

Конструктивный узел, с помощью которого в процессе работы аппарата производятся периодические замыкания и размыкания электрической цепи, называется **электрическим контактным соединением**.

Контактное соединение состоит в большинстве случаев из подвижного и неподвижного элементов.

Контакты аппаратов подразделяются на коммутирующие, замыкающие и размыкающие цепи в процессе работы электрооборудования и не размыкаемые контактные соединения токоведущих частей (шин, проводников, гибких соединений), связь между которыми осуществляется механическими способами крепления (болтовыми и винтовыми соединениями, пайкой и другими способами). В замкнутом положении коммутирующие контакты сжаты с определенным усилием (контактным нажатием), создаваемым контактными пружинами.

Поверхность соприкосновения проводников носит название *контактной поверхности*. В зависимости от вида контактирующих поверхностей различают точечные, линейные и плоскостные контакты.

При точечном контакте контактирующие поверхности соприкасаются в точке. Например, при соприкосновении таких поверхностей как сфера – сфера, сфера – плоскость, вершина конуса – плоскость и т.п. Физическая картина контактирования здесь представляет собой только одну точку – площадку.

При линейном контакте контактирующие поверхности соприкасаются по линии. Например, при соприкосновении таких поверхностей как цилиндр – цилиндр (по образующей), цилиндр – плоскость, тор – плоскость и т. п. Физическая картина контактирования здесь представляет собой ряд точек-площадок (минимум две), расположенных на одной линии.

При плоскостном контакте контактирующие поверхности соприкасаются по поверхности. Физическая картина контактирования здесь представляет собой ряд точек-площадок (минимум три), расположенных на этой поверхности.

В пределах поверхности соприкосновения контактов контакт происходит лишь на отдельных участках, площадь которых во много раз меньше номинальной (кажущейся) поверхности соприкосновения. При этом, в пределах этих отдельных участков истинный металлический контакт происходит также лишь на отдельных участках из-за наличия здесь различных пленок.

Их количество зависит от нагрузки (силы сжатия контактов), температуры, механических свойств контактного материала и его геометрических очертаний.

Благодаря нажатию контактов вершины выступов деформируются, и образуются площади действительного касания контактов.

В результате стягивания линий тока к площадкам касания их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления.

Такое сопротивление называется переходным сопротивлением стягивания контакта $R_{\text{пер}}$. Оно пропорционально удельному сопротивлению материала контакта ρ , корню квадратному от временного сопротивления на смятие этого материала σ и обратно пропорционально корню квадратному из силы контактного нажатия $P_{\text{конт}}$

$$R_{\text{пер}} = \frac{\rho \sqrt{\pi \cdot \sigma}}{\sqrt{P_{\text{конт}}}}. \quad (4.1)$$

Как видно из приведенного графика (рис. 4.1), с ростом контактного нажатия $P_{\text{конт}}$ переходное сопротивление уменьшается. При многократных замыканиях и размыканиях контактов кривые не повторяют друг друга, так как в каждом случае касание происходит в различных точках.

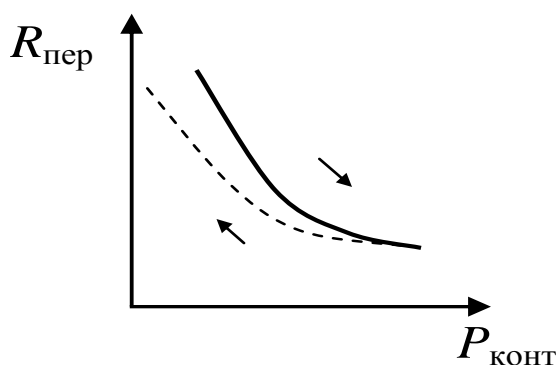


Рис. 4.1. Зависимость переходного сопротивления стягивания контакта от контактного нажатия

Таким образом, полное сопротивление контактного соединения состоит из двух составляющих: сопротивления собственного материала контактных элементов и переходного сопротивления в местах их соприкосновения, т.е.

$$R_{\text{КОНТ}} = R_{\text{МАТ}} + R_{\text{ПЕРЕХ}} \quad (4.2)$$

На величину переходного сопротивления оказывает влияние ряд факторов:

А. Влияние материала контакта

Величина напряжения смятия σ при смятии материала от прижатия поверхностей контактов S внешней силой F зависит от твердости используемого материала

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (4.3)$$

Медь является одним из наиболее распространенных проводниковых материалов, применяемых для контактов аппаратов.

При применяемых покрытиях твердых металлов мягкими (меди – оловом, серебром; стали – кадмием и цинком) σ уменьшается, а действительная контактная поверхность увеличивается, вследствие чего $R_{\text{пер}}$ падает при том же усилии нажатия.

Величина переходного сопротивления изменяется в зависимости от удельного сопротивления материала контактов, уменьшаясь при снижении последнего.

Б. Влияние температуры

Энергия, выделяющаяся при прохождении тока через контактные элементы, частично превращается в тепловую, нагревая их в процессе работы и рассеиваясь в окружающую среду.

Чрезмерный нагрев контактов часто приводит к их окислению, причем оксидные пленки большей части металлов неэлектропроводны и увеличивают величину переходного сопротивления.

Единственным материалом, имеющим оксидную пленку такого же удельного сопротивления, как и сам металл, является серебро.

Металлом, вообще не образующим оксидных пленок, является платина.

С повышением температуры контактов окисление обычно увеличивается и для большинства металлов становится существенным начиная с температуры 70–75°C.

Особенно значительно повышение температуры контактов при КЗ в цепи. В условиях КЗ происходит деформация материала и изменение формы контактов, снижение их механической прочности и других свойств. Для ряда аппаратов размеры контактов определяются возможностью работы при токах КЗ. При определении предельно допустимой для аппарата величины тока КЗ длительность прохождения тока принимают равной 1, 5 или 10 с.

Предельно допустимая кратковременная температура контактов при КЗ для контактов из меди – 200–300°C, для контактов из алюминия – 150–200°C.

В. Влияние величины и состояния контактной поверхности

Размеры контактной поверхности мало влияет на контактное сопротивление, так как одновременно с увеличением числа точек действительного соприкосновения уменьшаются нажатие на единицу поверхности и ее смятие.

Размеры поверхности контакта имеет значение для условий нагрева, так как с их увеличением усиливается теплоемкость и поверхность охлаждения.

При том же сопротивлении большие по размеру контакты допускают большую нагрузку по току.

Обработка поверхности контакта также влияет на его переходное сопротивление. Переходное сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Г. Влияние силы нажатия

В области малых усилий на контакт наблюдается резкое увеличение переходного сопротивления.

При очень больших силах нажатия величина переходного сопротивления контактов меняется незначительно. Кроме того, слишком большие силы нажатия вызывают чрезмерные напряжения в материале контактов, вследствие чего утрачивается их упругость, они становятся менее прочными.

Каждый металл характеризуется определенным оптимальным значением усилия, обеспечивающим предельное давление, выше которого переходное сопротивление остается неизменным.

4.2. Износ контактов

Различают механический и электрический износ контактов. Последний значительно больше и существеннее определяет работу контактов.

Износ контактов можно определить двумя способами:

- по провалу контактов;
- по уменьшению веса контактов.

Механический износ в основном является следствием ударов между собой контактных элементов при их соприкосновении, а также ударов в приводном механизме. В результате происходит деформация. Механический износ контактов пропорционален числу срабатываний контактов.

Сравнение медных и медно-вольфрамовых сплавов показывает, что сплав при токах до 20 кА выдерживает в несколько раз большее число включений до полного износа, чем медь [1]. В реальной аппаратуре применяется сплав – серебро-никель. Он дает значительно меньший износ, чем медь.

К электрическому износу следует отнести эрозию и коррозию поверхностей контактов.

Износ контактов в результате переноса материала с одного контакта на другой, то есть испарение в окружающее пространство без изменения состава материала называется *физическим износом* или *эрозией*.

Износ, связанный с окислением и образованием на контактах 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 называют положительной эрозией, перенос в обратную сторону – отрицательной.

Мерой эрозии является потеря массы или объема контакта.

Более твердые металлы менее подвержены электрическому износу. Для предохранения контактов от эрозии контакты шунтируют емкостью. Это уменьшает ток между контактами при их разрыве. Электрическая энергия затрачивается при этом на заряд конденсатора. Для ограничения начального разрядного тока при последующем замыкании контактов, чтобы не было приваривания контактов, последовательно с емкостью устанавливают дополнительно активное сопротивление.

4.3. Материалы контактов

Требования:

- механическая прочность;
- высокая электропроводность;
- теплостойкость;

- антикоррозийность;
- простота обработки;
- экономичность.

Выбором материала в большей мере определяется срок службы контактного соединения электрического аппарата.

Для контактных соединений нашли широкое применение *медь и ее сплавы (латунь и бронза)*. Достоинства – малое удельное сопротивление, механическая прочность, легкая обработка. Медь заметно окисляется при температуре выше 75°C. Для предотвращения окисления медные контакты покрываются оловом. При длительной работе (непрерывной) контакты из меди выполняются с серебряными накладками толщиной 20–30 микрон электролитическим способом, что позволяет отключать мощную электродугу и обеспечивать большое число включений. Наименьшая электропроводность – у чистой меди, примеси снижают удельную проводимость. Медь технологична, легко паяется и сваривается.

Недостатки – дефицитность, низкая температура плавления, требуются довольно большое нажатие, наличие оксидной пленки. В контактах, не имеющих взаимного скольжения из-за оксидной пленки, применять медь не рекомендуется.

Латунь – медно-цинковый сплав, содержит цинка до 45%. Она дешевле меди, но прочнее и тверже ее. Хорошо обрабатывается в холодном и горячем состоянии. С ростом содержания цинка предел прочности при растяжении у латуней возрастает. Поэтому она более пластична в холодном состоянии. Латунь применяется для изготовления литых токоведущих деталей электрических машин и аппаратов, для заливки КЗ роторов асинхронных электродвигателей.

Бронза – сплав меди с различными химическими элементами, кроме цинка и никеля. Она по сравнению с медью отличается *высокой механической прочностью, твердостью, упругостью*. Из нее изготавливают контактные провода, коллективные пластины, контактные ножи, скользящие контакты, токоведущие пружины.

Алюминий. Достоинство – в 3,3 раза легче меди. Удельная проводимость чистого алюминия составляет 65,5% проводимости стандартной меди – 38 мСм/м, $\rho = 0,0262$ мкОм·м.

Преимущества:

- пластичность;
- хорошая технологичность;
- коррозионная стойкость.

Алюминиевый провод по сравнению с медным той же длины при одинаковом сопротивлении имеет сечение примерно на 65% больше (диаметр больше на 28%), однако он при этом будет почти в 2 раза легче.

Алюминий и сталь применяются, главным образом, в неподвижных контактных соединениях, а при изготовлении из стали покрываются слоем кадмия.

Алюминий имеет достаточно высокие электрические проводимости и теплопроводность. Благодаря малой плотности, токоведущая часть круглого сечения из алюминия на такой же ток, как и медный проводник, имеет почти на 48 % меньше массу. Легче меди в 3,3 раза.

Недостатки алюминия – образование оксидной пленки с высокой механической прочностью (для защиты от коррозии контакты из алюминия оцинковываются), низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра), малая механическая прочность. Алюминий существенно уступает другим материалам в механической прочности.

Алюминиевые сплавы сочетают легкость с повышенной, по сравнению с алюминием, механической прочностью. Электрические, механические и технологические свойства можно регулировать легирующими добавками.

Электрический алюминиевый провод делается из сплава АВЕ (алюминий + магний + кремний).

Для выполнения контактов применяется **вольфрам**, отличающийся теплостойкостью и твердостью, необходимой при частых коммутациях контактов. Имеет высокую дугостойкость, стойкость против эрозии.

Недостатки – высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, оксидная пленка с высокой механической прочностью. Контакты из вольфрама требуют большого нажатия.

Высокими свойствами обладают контакты, выполненные путем прессования из смеси порошков различных материалов – **металлокерамические контакты**. Их дугостойкость обеспечивается вольфрамом, молибденом. Низкое переходное сопротивление – серебром, медью.

Такие контакты обладают всеми необходимыми свойствами, которые не в полной мере могут удовлетворить чистые металлы. Металлокерамика ведет себя при разных токах по-разному.

Никель, платина, серебро применяются для контактов, рассчитанных на небольшие токи. При большом числе включений в час применяется сплав платины с иридием. Применяются в реле, где требуется высокая чувствительность, точность и надежность срабатывания.

Контрольные вопросы

1. Как различаются контакты в зависимости от вида контактирующих поверхностей?
2. Что такое переходное сопротивление электрического контакта?
3. Какова зависимость переходного сопротивления от контактного нажатия?
4. Какова зависимость переходного сопротивления от температуры?
5. Какова зависимость переходного сопротивления от материала контактов?
6. Каков нагрев контактов при длительном прохождении номинального тока?
7. Каков нагрев контактов при прохождении тока короткого замыкания?

ГЛАВА 5. РАБОТА КОНТАКНОГО СОЕДИНЕНИЯ

5.1. Включение цепи

При включении цепи имеет место вибрация контактов, эрозия на поверхности контактов в результате образования электрического разряда между ними.

При вибрации контактов происходит многократное образование электрической дуги, которое приводит к их сильному износу из-за оплавления и распыления материала контактов. В связи с этим уменьшается усилие их нажатия во включенном состоянии, что ведет к росту переходного сопротивления.

Для уменьшения вибрации создается предварительное контактное нажатие при разомкнутых контактах. В момент касания контактов это нажатие возрастает не с нуля, а с предварительно установленной начальной величины.

5.2. Работа контактов во включенном состоянии

Следует различать два случая:

- через контакты протекает длительный номинальный ток;
- через контакты протекает ток КЗ.

При КЗ из-за малого постоянного времени нагрева температура контактной поверхности поднимается практически мгновенно и может достигнуть температуры плавления.

С точки зрения нагрева контакты являются наиболее нагруженным местом токоведущей цепи.

При больших токах (более 2 кА) идут по пути повышения температуры контактной точки до 200°C (при серебряных контактах) и применяют жидкостное охлаждение. В этом случае удастся значительно облегчить контактную систему, уменьшить габаритные размеры аппарата и получить высокое быстродействие.

5.3. Отключение цепи

В процессе размыкания контактов контактное нажатие уменьшается, переходное сопротивление растет, и за счет этого растет температура точек касания контакта. 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 либо тлеющий разряд.

Высокая температура приводит к интенсивному окислению и распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию оксидных пленок.

Для существования дугового разряда необходимо, чтобы значения напряжения и тока превышали минимальные значения U_0 , I_0 . В таблице 5.1 [12] приведены значения U_0 , I_0 для различных материалов.

Если $I < I_0$, то происходит тлеющий разряд или искра, при $U = 270\text{--}330$ В.

Таблица 5.1.

Минимальные значения U_0 и I_0 для поддержания дугового разряда

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

Поведение контактов несколько различается при постоянном и переменном токе. У контактов переменного тока большую роль играет скорость размыкания контактов. Износ растет с увеличением этой скорости.

5.4. Основные конструктивные исполнения контактных соединений

5.4.1. Жесткие неразъемные контакты

Различают разборные и неразборные контакты. Они служат для соединения неподвижных токоведущих деталей в виде нескольких параллельных плоских шин, проводов, кабелей. Контакты в этом случае соединяются с помощью болтов (разборные) либо с помощью горячей или холодной сварки (неразборные).

Болтовое соединение в данном случае является не токоведущим, а лишь соединяющим отдельные токоведущие шины и выбирается по величине контактного нажатия. Для защиты от самоотвертывания гаек при прохождении больших токов нагрузки применяются пружинные шайбы. Момент затяжки болтов контролируется специальным тарированным моментным ключом.

При болтовом соединении медные шины перед сборкой тщательно зачищаются от оксидов и смазываются техническим вазелином.

После сборки места стыков 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 увеличивается количество площадок смятия и переходное сопротивление становится более стабильным.

Болтовые соединения из алюминия могут оказаться ненадежными и здесь применяют сварку, после чего контакт становится неразборным.

Стягивающие стальные болты нагреваются в основном за счет теплопроводности, так как через болты ток практически не проходит. Температура болтов обычно не превосходит 20% температуры шин. Температурный коэффициент расширения у меди и алюминия значительно больше, 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 контактов из-за вытягивания болтов нажатие в контактах уменьшается, что приводит к увеличению переходного сопротивления, сильному нагреву и последующему разрушению контакта.

Для того, чтобы избежать пластической деформации, на шины ставят соответствующие пружинящие шайбы, которые ограничивают деформацию элементов контактов.

При разъемных контактах при КЗ в болтах возникают большие механические напряжения вследствие неодинакового теплового расширения болтов и шин, особенно если они выполнены из разных материалов. В случае применения алюминия напряжение в болтах значительно больше, чем в случае использования меди. Это связано с большим температурным расширением и меньшим модулем упругости у алюминия.

5.4.2. Подвижные неразмыкающие контакты

Подвижные неразмыкающие контакты используются для передачи тока с подвижного контакта на неподвижный. Это тип соединения – гибкая связь. Такой контакт применяется при перемещениях подвижного элемента не более 0,25 м.

При больших ходах и больших номинальных токах применяются контактные соединения в виде скользящих или роликовых токосъемов. Недостаток – большая сила трения. Сила трения уменьшается при роликовом контакте. Число роликов зависит от номинального тока и тока КЗ.

5.4.3. Разрывные контакты

Конструкция разрывных контактов определяется значениями номинального тока, номинального напряжения, тока КЗ, режимом работы и назначением электрического аппарата.

По характеру сопротивления подвижного и неподвижного контактов различают:

- точечные контакты, для них характерно большое значение давления в контакте и малое переходное сопротивление;
- линейные контакты: в них меньше давление, но большая масса контакта, что определяет большее значение тока;
- плоскостные контакты: в таких контактах еще меньше давление и большая масса контактов.

Подвижные контакты, имеющие возможность устанавливаться в положении с максимальным числом контактных площадок, называются самоустанавливающимися (торцевой, мостиковый контакт).

По конструктивному исполнению контакты электрических аппаратов подразделяются на:

- рычажные;
- мостиковые;
- врубовые;
- розеточные;
- роликовые;
- торцевые;
- пальцевые;
- скользящие;
- точечные;
- герконовые.

Рычажные контакты применяются в аппаратах с поворотной подвижной системой. Схема такого контакта представлена на рисунке 5.1.

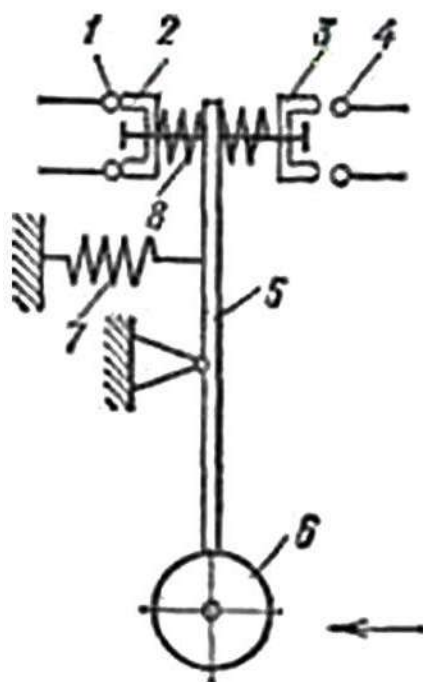


Рис. 5.1. Схема рычажного контакта: 1, 4 – неподвижные контакты; 2, 3 – контактные мостики; 5, 9, 13 – рычаги; 6 – ролик; 7 – возвратная пружина; 8 – пружина контактных мостиков

Их рабочая поверхность выполняется в виде:

- плоскость – цилиндр,
- цилиндр – цилиндр;

Используемые материалы:

- медь,
- напайки из серебра или серебряная металлокерамика (серебро – вольфрам, серебро – молибден).

Первый имеет хорошую проводимость, второй – большую механическую стойкость.

Контактное нажатие создается специальной пружиной. Ток к подвижному контакту подводится через гибкую связь. Различают рычажные контакты с плоскими поверхностями и рычажные с притиранием конструктивных поверхностей (рогообразные) – в них обеспечивается замыкание контактов с проскальзыванием и перекачиванием.

Мостиковые контакты (рис. 5.2) применяются, главным образом, в аппаратах с прямоходовой подвижной системой. Их достоинство – отсутствие гибкого соединения и двойной разрыв, улучшающий гашение электрической дуги.

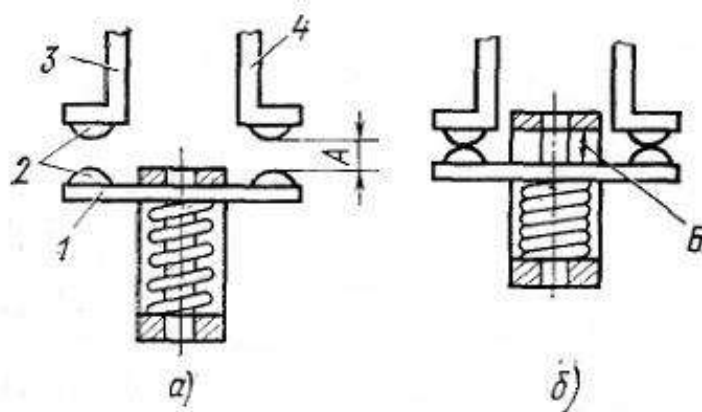


Рис. 5.2. Мостиковый контакт:
a – разомкнут, *б* – замкнут; А – раствор, Б – провал

Недостаток – удвоенное переходное сопротивление, поэтому медные контакты здесь не применяются, а используются контакты из серебра и серебряной металлокерамики. Рабочие поверхности:

- плоскость – плоскость,
- плоскость – сфера,
- цилиндр – цилиндр,
- цилиндр – плоскость,
- сфера – сфера.

Мостиковые контакты применяются в цепях низкого напряжения с небольшими значениями разрывных токов. Являются самоустанавливающимися подвижными контактами с нажимной пружиной. Такие контакты отличаются механической износоустойчивостью и могут выдерживать большое число включений.

Врубовые контакты применяются в рубильниках, предохранителях, пакетных выключателях. Контактное нажатие в контактах для небольших токов создается за счет упругих свойств стенок материала (твердотянутая медь, специальная бронза), которым придается соответствующая форма. В контактах на большие токи имеются специальные пружины. Врубовые контакты не обеспечивают гашение дуги. Контактные поверхности – линейные или плоские.

Разновидностью врубовых контактов являются **розеточные** контакты.

У них контактным ножом служит штыревой контакт. Розеточные конструкции не могут отключить значительные токи. Возникающая при этом дуга нарушает контактную поверхность, на ней появляется оплавление. Во избежание этого применяют параллельное включение дугогасительных контактов.

Роликовые контакты служат для токосъема с неподвижных конструкций, переключаемых роликами на подвижный контакт. В этом случае ролики как бы заменяют гибкую связь. Эти контакты широко применяются при больших токах подвижного контакта и больших номинальных токах.

Скользящие контакты осуществляют передачу тока с неподвижной контактной детали на подвижную без обрыва цепи. Разновидностью скользящего контакта является **шарнирный** контакт. Он одновременно обеспечивает и механическую связь между деталями. В электрических аппаратах низкого напряжения скользящие соединения применяются в реостатах и контроллерах.

Щеточный контакт применяется в автоматических выключателях и реостатах, относится к линейным контактными соединениям. Это упругий контакт, применяемый для значительных токов. Он менее экономичен, чем сплошной вследствие усложнения своего изготовления.

Устройство щеточного контакта представлено на рис. 5.3. 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 создает 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.

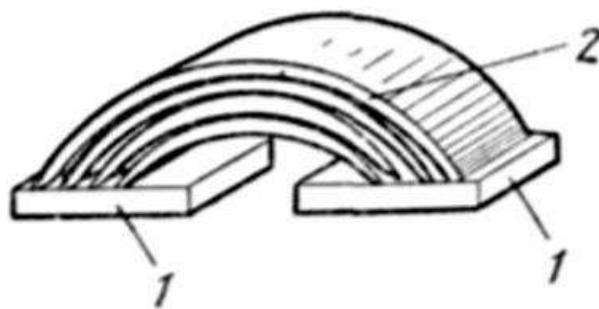


Рис. 5.3. Щеточный контакт

Щеточные контакты не применяются в качестве дугогасительных, так как при оплавлении они превращаются в сплошной контакт.

Конструкция. Один контакт представляет собой плоский медный нож клиновидной формы. Вторым контактом (щеткой) состоит из набора пластинок толщиной 0,1–0,5 мм из твердой меди и специальной бронзы.

Торцевые контакты выполняются в виде сплошных металлических стержней или труб. Их контактные поверхности могут быть плоскими или сферическими. Контакты имеют большое переходное сопротивление и поэтому требуют значительного нажатия. Они нуждаются в гибкой связи, роликовых или других токопроводах.

Пальцевые контакты применяются в аппаратах барабанного типа – контроллерах и высоковольтных выключателях. Они относятся к упругим скользящим контактам. Могут использоваться как основными, так и в качестве дугогасительных.

5.4.4. Жидкометаллические контакты

Твердометаллические контакты имеют характерные недостатки:

- с ростом длительного номинального тока возрастают необходимые значения контактного нажатия, габариты и масса контактов;
- эрозия контактов ограничивается износостойкостью аппарата;
- окисление поверхности и возможность сваривания контактов понижают надежность аппарата.

Жидкометаллические контакты имеют ряд преимуществ:

- малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела жидкий металл – электрод до 120 А / мм^2 , что позволяет резко сократить габариты контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах;
- отсутствие вибрации, приваривания, залипания, окисление контактов при их коммутации;
- высокая механическая и электрическая износостойкость;
- возможность использования нового принципа действия (автоматический восстанавливающийся предохранитель) благодаря свойствам текучести жидкого металла;
- возможность работы при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

Рассмотрим принцип действия контактора с жидкометаллическим контактом (ЖМК) (рис. 5.4).

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.

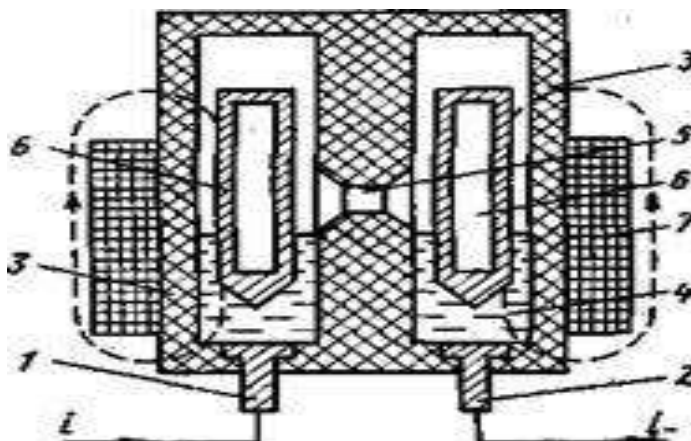


Рис. 5.4. Устройство контактора с жидкометаллическим контактом (ЖМК)

К жидкометаллическим контактам предъявляется такое требование, чтобы жидкий металл сохранял свое состояние при температуре $\pm 40^{\circ}\text{C}$. При температуре меньше 0°C только ртуть находится в жидком состоянии и может в чистом виде быть пригодна для данного типа контактов, но она токсична и сейчас не применяется.

Контрольные вопросы

1. Что является наиболее нагруженным местом токоведущей цепи?
2. Что происходит на контакте при отключении цепи?
3. Какие виды соединения называются неразъемными?
4. Какие конструктивные исполнения имеют контакты?
5. В чем преимущество жидкометаллических контактов?

ГЛАВА 6. ГОРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Коммутация контактных силовых аппаратов может сопровождаться возникновением электрической дуги.

При этом промежуток между контактами становится проводящим, и прохождение тока в цепи не прекращается, несмотря на разрыв контактов.

Электрический разряд приводит к износу контактов аппарата и может быть либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой (дуговым разрядом).

Тлеющий разряд возникает при токах менее 0,1 А при напряжении на контактах 250–300 В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле. В более мощных аппаратах тлеющий разряд является переходной фазой к дуговому разряду.

Дуговой разряд может начинаться при следующих условиях:

- напряжения между контактами должно быть не менее 10–20 В. Это наименьшее околоэлектродное напряжение, вызывающее появление электрической дуги называется катодным падением напряжения и зависит от материала контакта (U_0).

- ток цепи должен быть не менее 80–100 мА.

Таким образом, электрическая дуга характеризуется потоком заряженных частиц (электронов), излучаемых с поверхности того из контактов, который является катодом, и устремляющихся по направлению ко второму контакту, являющемуся анодом.

Процесс появления в дуговых промежутках электрических зарядов, положительных ионов и отрицательных электронов называется *ионизацией*.

Известно четыре основных пути появления электрических зарядов:

- ударная ионизация: возникает при весьма значительных напряжениях;
- термическая ионизация: процесс появления зарядов при температурах выше 5000 °С;
- термоэлектронная ионизация: процесс испускания электронов катодом до температуры, при которой начинается термоионное излучение, катод при этом разогревается.
- автоэлектронная эмиссия: процесс вырывания электронов с поверхности катода силами электрического поля.

Обратный процесс ионизации, то есть процесс уменьшения количества заряженных частиц в дуговом промежутке называется *деионизацией*.

Деионизация дуги происходит двумя путями:

- путем воссоединения (*рекомбинации*) положительных ионов с электронами;
- путем перемещения (*диффузии*) заряженных частиц из области горения дуги в окружающее пространство.

Рекомбинация зарядов происходит в основном при непосредственном столкновении электронов с положительными ионами. Процесс рекомбинации значительно усиливается, если в области горения дуги находится твердый диэлектрик.

Диффузия происходит вследствие неравномерности распределения зарядов по сечению дуги, а также за счет разности температур дуги и окружающей среды. С повышением разности температур диффузия зарядов увеличивается.

Процессы ионизации и деионизации в электрической дуге протекают параллельно друг другу.

К числу мер, облегчающих гашения дуги, относится диссоциация (разложение) нейтральных молекул газа на нейтральные атомы. Диссоциация молекул газов происходит под действием высокой температуры дуги и сопровождается поглощением тепловой энергии. Температура дуги понижается и процесс образования заряженных частиц затрудняется.

Температура, при которой наблюдается диссоциация газов, ниже температуры ионизации.

В конечном счете, диссоциация газов ускоряет перенос тепловой энергии от дугового ствола в окружающее пространство.

В качестве дугогасящего газа могут применяться воздух, водород, азот, кислород, углекислый газ и водяной пар.

Лучшими дугогасящими свойствами обладает водород.

В дуговом разряде можно выделить три характерных области:

- околокатодную область;
- область столба дуги;
- околоанодную область.

В каждой из этих областей процессы ионизации и деионизации протекают по разному.

6.1. Околокатодная область

Околокатодная область занимает весьма небольшое пространство длиной не более 10^{-6} м. Около катода возникает положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между катодом и положительным объемным зарядом создается электрическое поле

с напряжением 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 и нейтральной частицы может произойти ионизация, для чего электрон должен обладать определенной энергией.

Для приобретения энергии электрон должен пройти напряжение (разгоняющее). Эта энергия необходима для ионизации, она называется потенциалом ионизации. Для газов он колеблется от 24,5 В (для гелия) до 13,3 В (для водорода).

Положительные ионы, также как и электроны, разгоняются электрическим полем, но из-за большой массы их скорость во многом меньше.

При ударе положительного иона о нейтральную частицу меньшая часть энергии передается на ионизацию, так что ионизация толчком (ударная) происходит в основном за счет электронов.

В виду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, достаточной для ионизации ударом. Чаще всего, после удара атом переходит в возбужденное состояние (электроны атома переходят на более удаленную от ядра орбиту).

Для ионизации возбужденного атома требуется меньшая энергия. В результате необходимый потенциал ионизации уменьшается. Такая ионизация называется ступенчатой. При ней необходим многократный удар электронов по атому – на каждый образующийся положительный ион требуется десятки электронов. Поэтому ток около катода, несмотря на наличие положительных ионов, носит электронный характер.

Образующие электроны не создают около катода отрицательного объемного заряда, так как их скорость значительно больше тяжелых положительных ионов, которые разгоняются в поле катодного падения напряжения и бомбардируют катод.

Благодаря этому, температура катода поднимается и достигает точки испарения материала электрода. При высоких температурах появляется термоэлектронная эмиссия, которая в сильной степени зависит от температуры электрода.

Исследования показывают, что дуга может существовать только за счет автоэлектронной эмиссии, создаваемой у катода электрическим полем.

Поток электронов из столба дуги устремляется к положительному электроду – аноду, который, в свою очередь, при дуговом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается отрицательный объемный заряд, что 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, под действием которой он нагревается до очень высокой температуры. Последняя, как правило, выше температуры катода. Мощный поток электронов выбивает из анода электроны, которые также участвуют в создании отрицательного объемного заряда.

Высокая температура анода и околоанодной области не оказывают существенного влияния на возникновение и условия существования дугового разряда. Роль анода сводится к приему электрического потока из дугового столба. Падение у катода составляет 10–20 В и зависит от материала катода и свойств газа, в котором горит дуга.

В области дугового столба положительные и отрицательные объемные заряды уравнивают друг друга и их результирующий заряд равен нулю.

Околоанодное падение напряжения составляет 5–10 В. При больших токах оно уменьшается, в то время как околокатодное напряжение остается постоянным.

Различают короткие (1,5–2 мм) и длинные (более 2 мм) дуги. Первые характерны при напряжениях меньше 1000 В, вторые – в высоковольтных аппаратах.

Условия гашения короткой дуги в значительной степени определяются процессами, происходящими у электродов и условиями их охлаждения.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения в столбе дуги значительно больше околокатодных и последними можно пренебречь. Условия существования длинных дуг определяется процессами в столбе дуги (рис. 6.1).

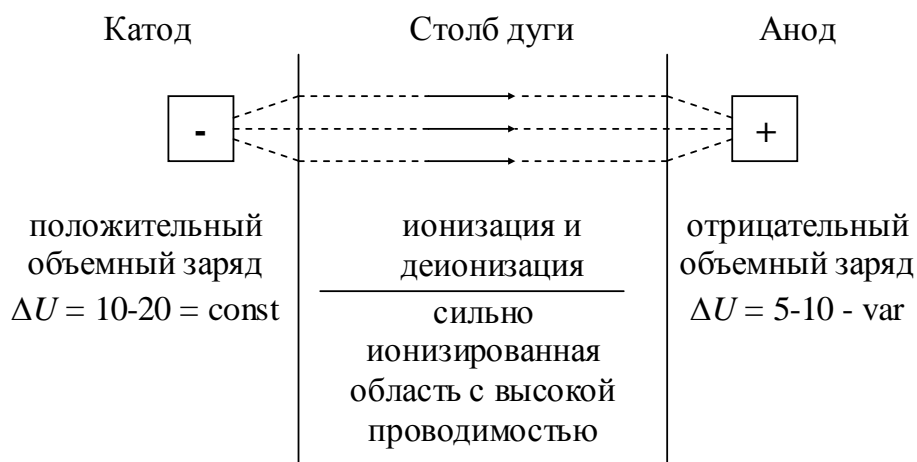


Рис. 6.1. Условия существования длинных дуг

Характерные виды влияния на условия гашения дуги:

1. Узкая щель.
2. Использование магнитного дутья.
3. Отвод тепла за счет охлаждения движущегося газа, либо отдача тепла стенками дугогасительных камер с высокой теплопроводностью.
4. Повышение давления газов в области горения дуги.
5. Использование для гашения водорода, выделяющегося при горении дуги в трансформаторном масле.
6. Использование элегаза, плотность которого в 5 раз больше, чем воздуха, а скорость движения дуги в нем в 3 раза меньше, чем в воздухе.

6.2. Область дугового столба

Энергия, приобретенная заряженными частицами в электрическом поле дугового столба, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит.

При больших температурах, которые имеют место в области дугового столба, скорость частиц возрастает до значений, при которых удар в нейтральный атом приводит к его ионизации (термической). Таким образом, основным источником ионов и электронов в столбе дуги является термическая ионизация. Чем меньше масса частиц, тем больше ее скорость движения.

Следует иметь в виду, что с ростом давления степень ионизации уменьшается. В связи с этим во многих дугогасительных устройствах создается повышенное давление газов, что способствует гашению дуги.

Очень сильное влияние на ионизацию оказывает температура, поэтому во всех дугогасительных устройствах стремятся отводить тепло от дуги за счет либо охлаждения движущимся воздухом или газом (воздушные, масляные выключатели), либо отдачи тепла стенкам дугогасительных камер.

В дуговом столбе, наряду с ионизацией, протекают процессы деионизации за счет рекомбинации и диффузии.

Анализ показывает, что скорость убывания числа заряженных частиц резко возрастает с уменьшением радиуса столба дуги. Поэтому в дугогасительных устройствах широко используют принцип узкой щели, образованной дугостойкими стенками с высокой теплопроводностью. При этом столб дуги деформируется стенками дугогасительного устройства, а его сечение приобретает прямоугольную форму. Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

Для открытой дуги, горящей в воздухе, излучением отводится 15–30% выделяемой в дуге энергии. Для дуги, горящей в закрытом дугогасительном устройстве, доля тепла, отводимая лучеиспусканием, меньше.

Отвод тепла за счет теплопроводности газа в значительной степени зависит от его температуры. Теплопроводность газа сильно зависит от его природы.

Так, средняя теплопроводность водорода в 17 раз больше, чем воздуха, 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.

Контрольные вопросы

1. Каковы области дугового разряда?
2. В каких единицах строится статическая вольт-амперная характеристика?
3. Назовите условия стабильного горения и гашения дуги постоянного тока.
4. Какие явления используются для гашения дуги?
5. Перечислите условия гашения дуги переменного тока.

ГЛАВА 7. СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

В современных аппаратах гашение дуги при отключении цепи осуществляется в дугогасительных устройствах, задача которых – погасить дугу в малом объеме (желательно замкнутом), за малое время, при малом износе частей аппаратов, при заданных перенапряжениях, при малых звуковом и световом эффектах.

Способы гашения дуги:

1. Гашение дуги в продольных щелях.
2. Гашение дуги с помощью дугогасительной решётки.
3. Гашение дуги высоким давлением.
4. Гашение дуги в масле.
5. Гашение дуги воздушным дутьём.
6. Гашение дуги в элегазе.
7. Гашение дуги в вакууме.

7.1. Широкие и узкие продольные щели

Весьма широкое распространение (особенно в низковольтных аппаратах) получили дугогасительные устройства (ДУ), камеры которых имеют продольные щели. Продольной называют щель, ось которой совпадает по направлению с осью ствола дуги. В таких камерах основное воздействие осуществляется на ствол дуги. Охлаждение ствола дуги (отбор энергии) происходит за счет движения дуги через неподвижный воздух и охлаждающего действия стенок камеры. Явления у электродов (их всего два) здесь можно учитывать при переменном токе и напряжениях ниже 220 В. Движение дуги в устройствах с продольными щелями происходит за счет взаимодействия тока дуги с создаваемым внешним магнитным полем и полем контура тока.

На рис. 7.1 схематично изображены характерные формы продольных щелей камер ДУ. В верхней части камеры *а*) между точками 1 и 2 имеется одна прямая продольная щель 3 с плоскопараллельными стенками. В камере *б* несколько прямых параллельных щелей, аналогичные щели в камере *а*.

Несколько параллельных щелей применяют при отключении больших токов. Однако параллельные дуги существуют недолго. Они весьма неустойчивы, и все, кроме одной (последней), быстро погасают. Условия гашения оставшейся дуги такие же, как в камере с одной щелью.

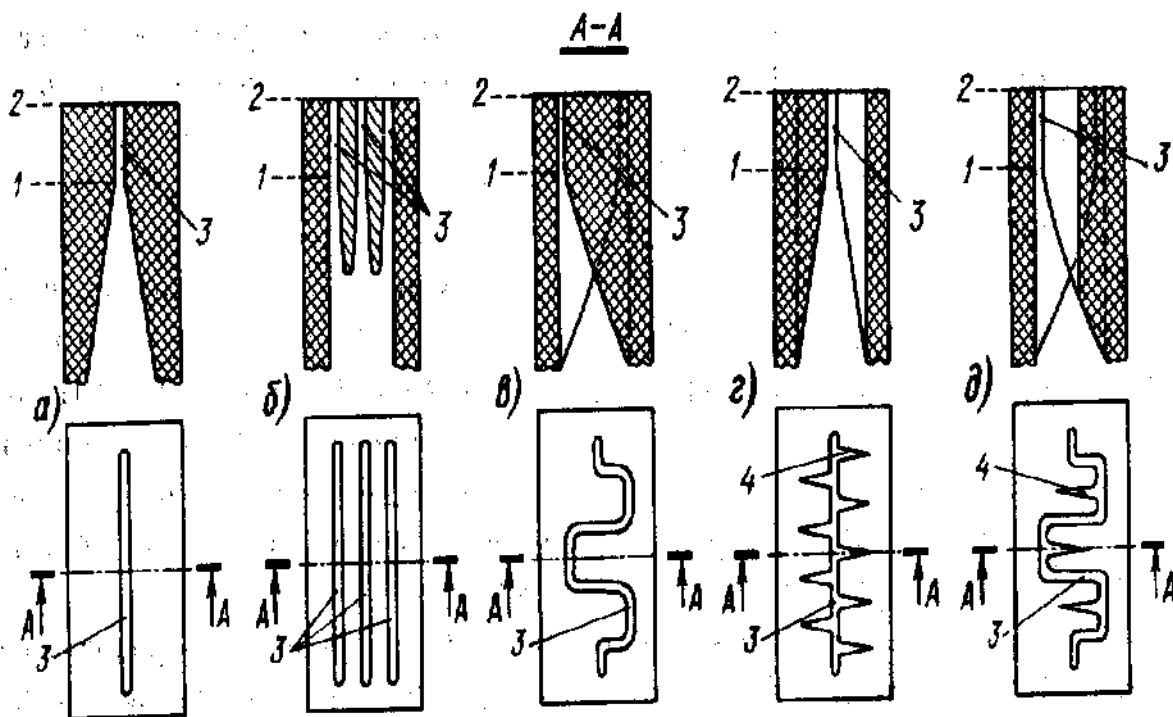


Рис. 7.1. Характерные формы продольных щелей дугогасительных камер

На рис. 7.1 (в) показана камера с одной продольной щелью 3, которой придана извилистая форма. При такой форме представляется возможным в камере небольших размеров уместить длинную дугу. Кроме того, наличие ребер способствует повышению напряжения на дуге. Именно эти особенности обуславливают те преимущества рассматриваемой камеры, которые обеспечивают ей широкое применение.

Продольная щель с рядом ребер и уширений 4, за счет которых происходит возрастание продольного градиента напряжения, изображена на рис. 7.1 (г).

Камера (рис. 7.1, д) имеет комбинированную зигзагообразную щель 3 с местными уширениями 4. В такой щели, по-видимому, должны сочетаться все достоинства зигзагообразной щели с преимуществами, которые дают местные уширения.

7.2. Дугогасительные решётки

В дугогасительной решетке для гашения дуги используется околоэлектродное падение напряжения U_z (в аппаратах постоянного тока) и околокатодная электрическая прочность (в аппаратах переменного тока).

На рис. 7.2 показаны различные схемы ДУ с дугогасительными решетками. В решетке на рис. 7.2(а) дуга выводится на пластины и делится

между ними с помощью магнитного поля напряженностью H , создаваемого специальной системой.

В решетке на рис. 7.2 (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. После расхождения контактов 1 и 2 (рис. 7.2 б) возникающая 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 удаётся поднять статическую вольт-амперную характеристику дуги и обеспечить условия её гашения.

В конструкции (рис. 7.2 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.

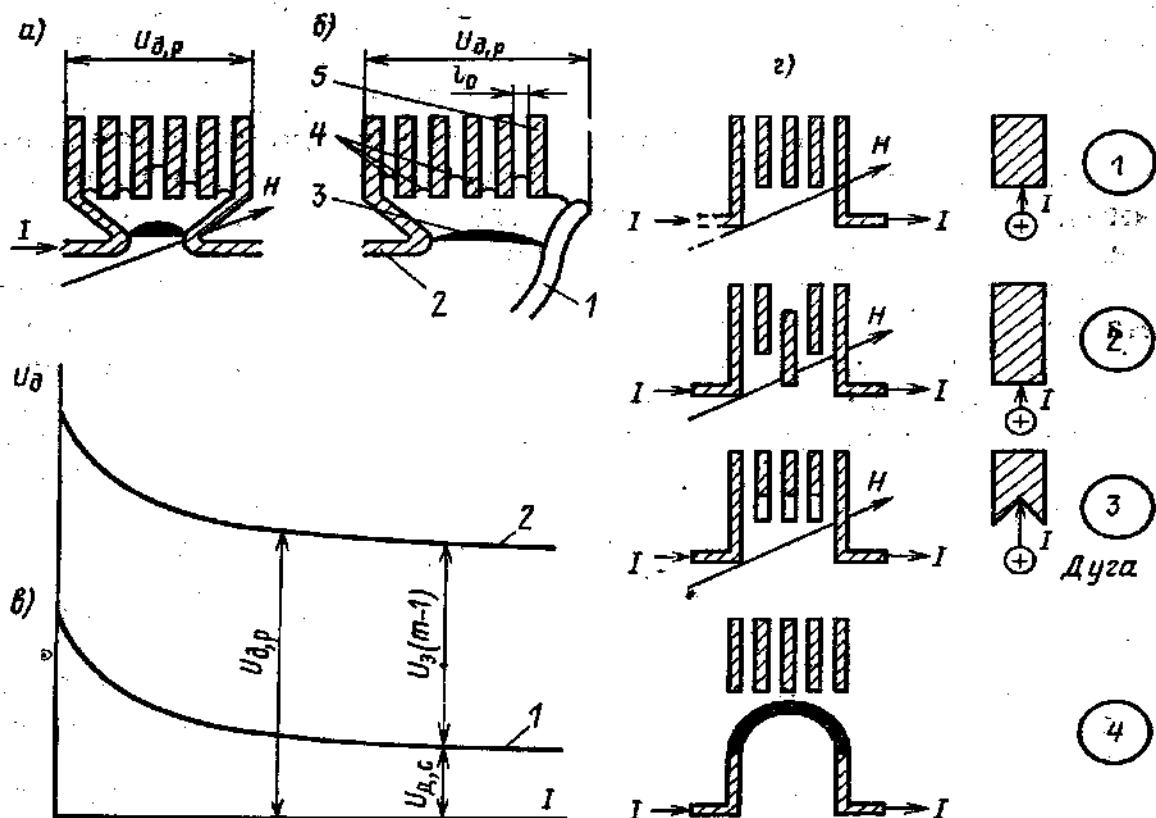


Рис. 7.2. Статические ВАХ электрической дуги в решётке
и виды дугогасительных решёток:
кривая 1 – напряжение на дуговых промежутках;
кривая 2 – результирующее напряжение

7.3. Гашение дуги высоким давлением

Гашение дуги при помощи высокого давления, создаваемого самой же дугой в плотно закрытых камерах, широко используется в плавких предохранителях и ряде других аппаратов. В этих аппаратах вся энергия, выделяющаяся в дуге отключения, отдается газу, находящемуся в ограниченном объеме. При условии, когда стенки камеры не выделяют газа, справедливо (в первом приближении) следующее соотношение:

$$pv = \frac{2}{3}W_d \cong \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2}L \cdot I_0^2 = \frac{1}{3}L \cdot I_0^2, \quad (7.1)$$

где W_d – энергия дуги, Дж; v – объем, см³; p – возникающее в камере давление, Па.

В результате дугу удастся погасить в небольших плотно закрытых камерах и сделать аппараты совершенно безопасными в пожарном отношении.

7.4. Гашение дуги в масле

Этот способ гашения нашёл широкое применение в выключателях переменного тока высокого напряжения.

Дугогасительные устройства современных масляных выключателей по принципу действия могут быть разделены на три основные группы:

1. Дугогасительные устройства с автодутьем, в которых дутье газопаровой смеси и масла в зону гашения дуги создается за счет энергии, выделяющейся в самой дуге.

2. Дугогасительные устройства с принудительным (импульсным) масляным дутьем, в которых масло в зону гашения дуги (к месту разрыва) подается с помощью специальных нагнетающих гидравлических механизмов за счет постороннего источника энергии.

3. Дугогасительные устройства с магнитным гашением дуги в масле, в которых ствол дуги под влиянием поперечного магнитного поля перемещается в узкие, заполненные маслом каналы и щели, образованные стенками из изоляционного материала.

Наибольшее распространение находят дугогасительные устройства первой группы, так как обеспечивают большую эффективность гашения при сравнительно несложных конструкциях.

Принципиальные схемы работы простейших дугогасительных камер с автодутьем приведены на рис. 7.3. Газовый пузырь, образующийся вокруг дуги при размыкании контактов, приводит к существенному повышению давления в ограниченном объеме камеры (положение *I*). Масло и продукты его разложения, стремясь выйти через отверстия в камере, создают интенсивное обдувание дуги потоками газопаровой смеси и масла вдоль дуги (*продольное дутье* – рис. 7.3 *а*) при выходе подвижной контакт-детали из камеры (положение *II*) или поперек дуги (*поперечное дутье* – рис. 7.3 *б*) при наличии выхлопного отверстия, расположенного против места разрыва (положение *II*).

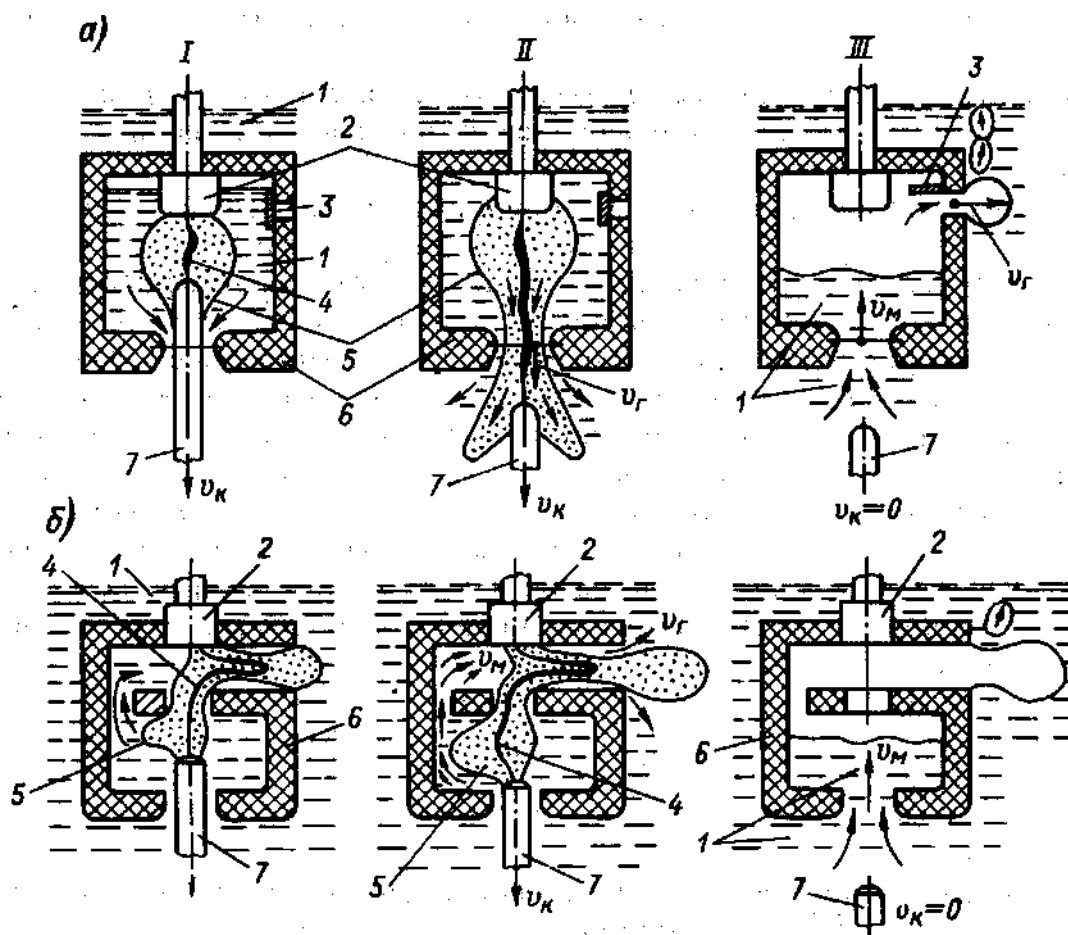


Рис. 7.3. Схемы процесса гашения электрической дуги в камерах с автодутьем:

а – камера продольного дутья; *б* – камера поперечного дутья;

1 – масло; 2 – неподвижный контакт; 3 – клапан; 4 – дуга;

5 – газовый пузырь; 6 – камера; 7 – подвижный контакт

После гашения дуги камера наполняется маслом (положение *III*). Современные масляные выключатели снабжены более сложными камерами, в которых используются указанные принципы в различных комбинациях с одним, двумя и большим числом разрывов.

7.5. Гашение дуги воздушным дутьём

Этот способ гашения нашел широкое применение в выключателях переменного тока на высокое напряжение.

Дуга, образуемая между контактами, обдувается вдоль или поперек потоком воздуха под определенным давлением (рис. 7.5). Перемещающийся с большой скоростью (приближающейся к звуковой) поток воздуха удаляет из зоны дуги нагретые ионизированные частицы, замещая их другими, охлажденными. Температура ствола дуги резко падает, особенно в момент прохождения тока через нуль. Одновременно происходит и механическое разрушение ствола дуги.

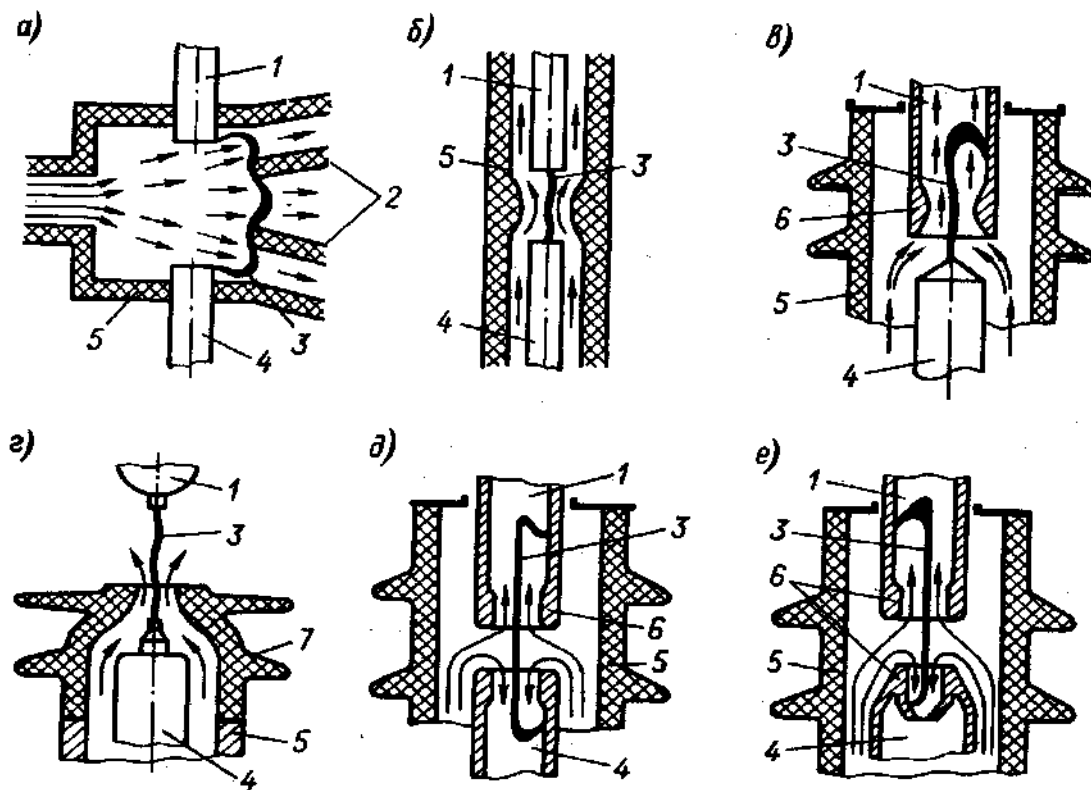


Рис. 7.5. Схемы камер с воздушным дутьем:

- а – поперечное дутье; б – продольное одностороннее в горловине камеры;
 в – продольное одностороннее через соплообразный контакт; г – продольное одностороннее через изоляционное сопло; д, е – продольное двустороннее через соплообразные контакты; 1 – неподвижный контакт; 2 – изоляционные перегородки; 3 – дуга; 4 – подвижный контакт; 5 – корпус камеры; 6 – металлическое сопло; 7 – изоляционное сопло

По отношению к стволу дуги поток воздуха может быть поперечным – поперечное воздушное дутье (рис. 7.5 а), продольным – продольное воздушное дутье (рисунок 7.5 б–е) и продольно-поперечным – продольно-поперечное дутье. Продольное и продольно-поперечное дутье может быть односторонним и двусторонним.

Поперечное дутье является весьма эффективным способом гашения, но имеет существенные недостатки. Работа камер связана с большим расходом воздуха и большим износом поперечных изоляционных перегородок 2 (рис. 7.5). Камеры оказываются достаточно сложными. Такое дутье применяется при напряжении до 20 кВ и токах отключения до 120 кА.

Продольное дутье нашло преимущественное распространение за счет своей простоты и надежности, малого износа камер. Эффективность этого способа гашения заключается в следующем. Сама камера находится в закрытом баке. Давление в камере много выше давления в баке. Вытекая из камеры под давлением 1–4 МПа, газовый поток направлен вдоль дуги. В сопле (рис. 7.5), где этот поток тесно соприкасается с дугой и проникает в нее, образуются два потока – поток холодного воздуха с температурой примерно $0,3 \cdot 10^3$ К и скоростью истечения v_x 330 м/с и поток горячего воздуха с температурой до $15 \cdot 10^3$ К и скоростью истечения до $v_T \sim 2500$ м/с. На границе этих потоков образуется интенсивное турбулентное движение. Перемешивание потоков и обеспечивает чрезвычайно интенсивный отбор теплоты от ствола дуги.

7.6. Гашение дуги в элегазе

В последние годы все более широко в высоковольтных выключателях вместо воздуха применяется элегаз – электротехнический газ. Элегаз – шестифторная сера SF_6 , обладает очень высокими дугогасительными свойствами, что позволяет при высокой отключающей способности выключателей существенно сократить их размеры, а также создать герметизированные (полностью закрытые) комплектные распределительные устройства.

7.7. Гашение дуги в вакууме

Известно, что вакуум обладает высокими изоляционными и дугогасящими свойствами. Достижения в области получения высокого вакуума $1,33 (10^{-4} \dots 10^{-6})$ Па в современных выключателях, а главное, сохранение его в процессе их работы, обеспечили внедрение и расширение применения этого способа гашения в выключателях на напряжения свыше 6–35 кВ.

Механизм гашения дуги в вакууме поясняется следующим образом. При расхождении контактов сперва образуется жидкий металлический мостик из материала электродов. Мостик очень быстро нагревается и испаряется, появляется дуга, которая горит в среде этих паров.

Такая дуга называется вакуумной. Её характерной особенностью является малое падение напряжения на ней (20–40 В). Только при токах 10–100 кА падение напряжения на дуге возрастает до 50–200 В. При прохождении тока через нуль дуга гаснет. Чрезвычайно большая разница в плотности частиц в плазме погасшей дуги и в пространстве камеры (вакууме) обуславливает исключительно высокую скорость диффузии зарядов из дугового промежутка. Соответственно, мгновенно достигается высокая начальная прочность промежутка. Восстанавливаемая электрическая прочность промежутка в зависимости от времени в вакууме на несколько порядков выше, чем в других средах. Последнее иллюстрируется на рис. 7.5.

7.8. Применение полупроводниковых приборов для облегчения гашения дуги

Одним из перспективных путей повышения эффективности коммутации силовых цепей, позволяющим исключить возникновение дуги отключения или ограничить время ее горения, является использование силовых полупроводниковых приборов. Во многих странах и в РФ ведутся работы по созданию коммутационных аппаратов на базе тиристоров и симисторов, однако до настоящего времени такие аппараты имеют ограниченное применение. Основными факторами, препятствующими широкому применению указанных аппаратов даже при низком напряжении, являются высокая стоимость, значительные габариты, отсутствие видимого разрыва цепи, чувствительность к перегрузкам, скорости нарастания тока и напряжения.

Более приемлемыми для силовых аппаратов признаны устройства с бездуговой коммутацией, основанные на использовании механических контактов и тиристоров или механических синхронизирующих устройств, контактов и неуправляемых диодов.

Контрольные вопросы

1. Назовите характерные формы щелей дугогасительных камер.
2. Поясните, за счет чего дуга втягивается в решетку дугогасительной камеры.
3. Поясните, в чем преимущество гашения дуги высоким давлением.
4. Назовите виды камер масляного выключателя.
5. Поясните, в какой момент восстанавливается диэлектрическая прочность вакуумного выключателя.
6. Назовите формулу элегаза.

ГЛАВА 8. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

8.1. Предохранители

Предохранители – это электроаппараты, предназначенные для защиты электрических цепей от аварийных токовых перегрузок и токов КЗ в силовых цепях и цепях сигнализации, управления и защиты.

Основными элементами предохранителя является 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 полупроводниковых приборов.

3. При КЗ в защищаемой цепи предохранители должны обеспечивать селективность защиты.

4. Характеристики предохранителя должны быть стабильными, а технический 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.

При значительных перегрузках 250–300% предохранители сгорают почти мгновенно, меньшие перегрузки они некоторое время выдерживают. Так, двухкратная перегрузка вызывает сгорание лишь через несколько десятков секунд, а перегрузка 25–30% практически не вызывает сгорания предохранителя в течение 1 часа.

8.2. Нагрев плавной вставки при длительной нагрузке

Основной характеристикой предохранителя является времятоковая характеристика, представляющая собой зависимость времени плавления вставки от протекающего тока (рис. 8.1).

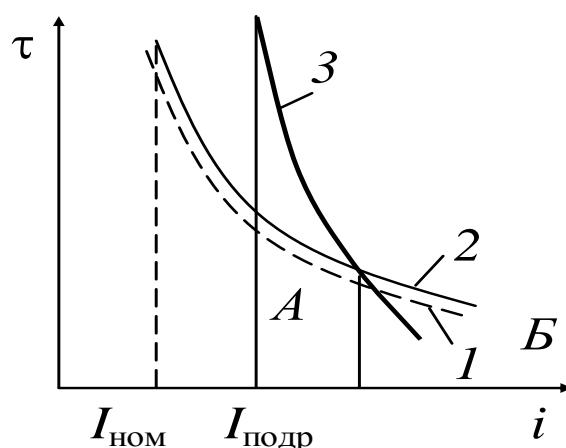


Рис. 8.1. Времятоковая характеристика

Для совершенной защиты желательно, чтобы времятоковая характеристика предохранителя (1) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемой цепи или объекта (2).

Однако реальная характеристика предохранителя (3) пересекает кривую 2. 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 B) предохранитель защищает объект. В области A предохранитель объект не защищает.

При небольших перегрузках (1,5–2) $I_{\text{ном}}$ 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 его установившейся температуры, называется пограничным током $I_{\text{погр}}$.

Для того, чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе $I_{\text{ном}}$, необходимо $I_{\text{погр}} > I_{\text{ном}}$. С другой стороны, для лучшей защиты значение $I_{\text{погр}}$ 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 (около 1 часа) 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 (медь, серебро, цинк, свинец).

Наименьшую $t_{\text{плавления}}$ имеет свинец – 327 °С. Но удельное сопротивление свинца в 12 раз выше, чем у меди. Это значит, что сечение вставки из свинца должно быть значительно больше, чем при использовании меди.

Широкое распространение получили медные и серебряные плавкие вставки с металлургическим эффектом.

На тонкую медную проволоку диаметром менее 1 мм 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 $\frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}$ 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.

Поэтому приходится завышать сечение вставки и, тем самым, увеличивать отношение $\frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}$ примерно до 1,8, что ухудшает защитные свойства предохранителя.

Серебряные плавкие вставки не подвержены тепловому старению, и для них отношение $\frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}$ определяется только нагревом.

У вставок из легкоплавких материалов эксплуатационная температура ближе к температуре плавления, что позволяет снизить отношение $\frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}$ до 1,2–1,4.

В настоящее время в качестве материала плавкой вставки начали применять алюминий. Пленка оксида на поверхности вставки защищает алюминий от коррозии и делает характеристику предохранителя стабильной. Большее удельное сопротивление материала компенсируется увеличением сечения вставки. Алюминий имеет температуру плавления ниже, чем у меди (658 против 1083 °C).

Медная вставка из-за высокой теплопроводности, высокой температуры плавления и большого отношения $\frac{I_{\text{погр}}}{I_{\text{ном}}}$ в области малых перегрузок не обеспечивает защиту объекта.

8.3. Нагрев плавкой вставки при КЗ

Если ток, проходящий через вставку, в 3–4 раза больше номинального, то практически процесс нагрева идет адиабатически, то есть все тепло, выделяемое плавкой вставкой, идет на ее нагрев.

После того, как температура плавкой вставки достигла температуры плавления, для перехода вставки из твердого состояния в жидкое ей необходимо сообщить тепло, равное скрытой температуре плавления.

По мере того, как часть плавкой вставки из твердого состояния перейдет в жидкое, ее удельное сопротивление резко увеличивается (в десятки раз).

Как только появится жидкий участок вставки, *электродинамические силы*, сжимающие проводник, образуют суженные участки. В этих условиях возрастает плотность тока и повышается температура. Уменьшение сечения вставки создает разрывающие усилия, аналогичные силам в контактах при КЗ.

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.

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 после начала КЗ, когда ток в цепи значительно меньше установившегося значения $I_{к.уст.}$.

8.4. Конструкция предохранителей низкого напряжения

Пробочные предохранители типа ПДС выпускаются на номинальное напряжение 320 В постоянного тока и 380 В переменного тока семи величин с номинальным током от 6 до 600 А. Предохранители предназначены для непосредственной установки на токоведущие шины распределительных устройств. Основание, корпус и головка предохранителя выполняются из стеатита.

Плавкая вставка представляет собой фарфоровый цилиндр, на конусных торцах которого укреплены контактные колпачки. Между колпачками внутри цилиндра расположена плавкая вставка.

Предохранитель имеет устройство, сигнализирующее о его срабатывании. При сгорании плавкой вставки освобождается специальная пружина, которая выбрасывает глазок, расположенный у застекленного окна головки предохранителя.

Перезарядка предохранителя производится путем замены фарфорового цилиндра вместе со сгоревшей плавкой вставкой и сигнализирующим устройством на новый цилиндр.

Трубчатые предохранители типа ПК представляют собой стеклянные трубки с металлическими колпачками конической формы и плавкой вставкой в виде прямой нити. Выполняются они на токи до 5 А.

8.4.1. Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме.

Выполняются на токи от 15 до 60 А. Имеют упрощенную конструкцию. Плавкая вставка прижимается к латунной обойме колпачком, который является выходным контактом.

Плавкая вставка штампуется из цинка, являющегося легкоплавким и стойким к коррозии материалом.

В предохранителях более 60 А плавкая вставка присоединяется к контактными ножам с помощью болтов.

Вставка располагается в герметическом трубчатом патроне, который состоит из фибрового цилиндра, латунной обоймы и латунного колпачка.

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 доли полупериода поднимается до 4–8 МПа. За счет увеличения давления поднимается вольтамперная характеристика дуги, что способствует ее быстрому гашению.

Плавкая вставка может иметь от одного до четырех сужений в зависимости от номинального напряжения (рис. 8.2). Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при КЗ и создают эффект токоограничения.

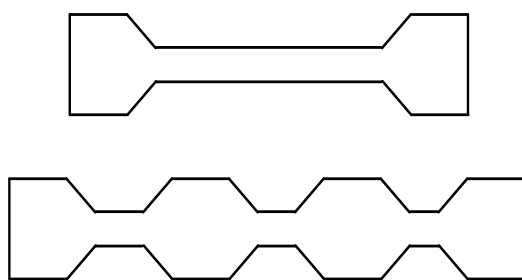


Рис. 8.2. Плавкая вставка

Вставка с четырьмя перешейками после перегорания образует четыре разрыва (рис. 8.2). На каждом катоде разрыва восстанавливается электрическая прочность около 200 В, а в сумме прочность предохранителя достигает 800 В. Это явление, наряду с высоким давлением, позволяет надежно гасить дуги при напряжении источника до 500 В. Согласно расчету, 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.

Поскольку гашение дуги происходит очень быстро (0,002 с), то можно считать, что уширенные вставки в процессе гашения остаются неподвижными (рис. 8.3).

Предохранители работают бесшумно, практически без выброса пламени и газов, что позволяет устанавливать их на близком расстоянии друг от друга.



Рис. 8.3. Плавкие вставки на различные номиналы

Предохранители выпускаются двух осевых размеров – короткие и длинные. Короткие предназначены для работы на переменном напряжении не выше 380 В. Они имеют меньшую отключающую способность, чем длинные рассчитанные на работу с напряжением до 500 В.

В зависимости от номинального тока выпускают шесть габаритов патронов различных диаметров. В патроне каждого габарита могут устанавливаться вставки на различные номинальные токи. Так, в патроне на номинальный ток 15 А могут быть установлены вставки на ток 6, 10 и 15 А.

Предохранители типа ПР-2 (разборный) обладают токоограничением (рис. 8.4). Так, в цепи с током КЗ 50000 А плавкая вставка на номинальный ток 6 А перегорает при токе всего 400 А. Однако чем больше номинальный ток, тем меньше эффект токоограничения.



Рис. 8.4. Предохранители ПР-2

При номинальном токе 600 А она отсутствует, так как дуга горит весь полупериод. Выполняются на токи 15–60 А с токоограничением в фибровом корпусе, короткие – на 380 В, длинные – на 500 В. Первые имеют меньшую отключающую способность. Номинальные токи – 6; 10; 15; 20; 25; 35–350 А; 430–1000 А. В зависимости от токов, выпускают 6 габаритов. Имеют от одного до четырех сужений.

8.4.2. Предохранители с мелкозернистым наполнителем ПН-2

Эти предохранители более совершенны, чем ПР-2 (рис. 8.5). Корпус квадратного сечения изготавливается из прочного фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки и наполнитель – кварцевый песок.



Рис. 8.5. Предохранители ПН-2

Плавкие вставки привариваются к диску, который крепится к пластинам, связанным с ножевыми контактами. Пластины крепятся к корпусу винтами (рис. 8.6).

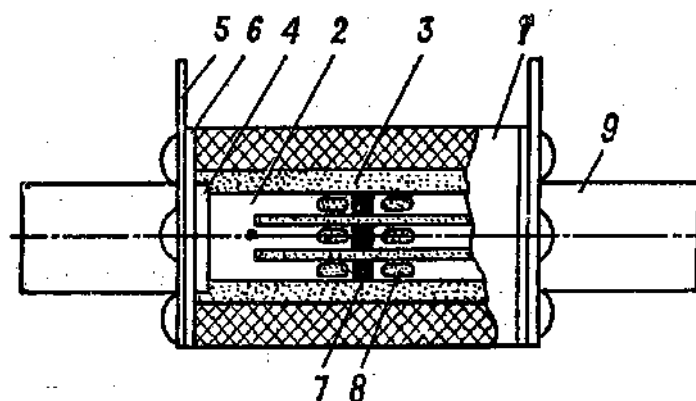


Рис. 8.6. Предохранитель ПН 2:

1 – корпус, 2 – вставка, 3 – песок, 4 – диск, 5 – пластины, 6 – прокладка,
7 – оловянные полоски, 8 – сужения, 9 – ножевые контакты

Кварцевый песок используется в качестве наполнителя с содержанием SiO_2 не менее 98 %, с размером зерна $(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ м и влажностью не выше 3 %. Перед засыпкой песок тщательно просушивают при $t = 120-180^\circ\text{C}$. 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. Она разделена на три параллельные ветви для более полного использования наполнителя.

Применение тонкой ленты, эффективный отвод тепла от суженных участков позволяют выбирать 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 (*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 вольтамперную характеристику. Этим обеспечивается гашение дуги за несколько миллисекунд.

После срабатывания предохранителя плавкие вставки вместе с диском заменяются, после чего патрон засыпается песком.

Предохранители ПН-2 выпускается на номинальные токи до 630 А. Предельный отключаемый ток КЗ, который может отключаться предохранителем, достигает 50 кА.

Малые габариты, незначительная затрата дефицитных материалов высокая токоограничивающая возможность являются достоинствами этого предохранителя.

В малогабаритных распределительных устройствах применяются резьбовые предохранители типа ПРС на токи до 100 А напряжением до 440 В постоянного и 500 В переменного тока частотой 50 Гц. Предельный отключаемый ток составляет 60 кА. Они более сложны в производстве и более дороги, чем ПН-2. Плавкая вставка – фарфоровый цилиндр, заполненный кварцевым песком. На торцах цилиндра колпачки.

Предохранитель имеет указатель срабатывания. При сгорании плавкой вставки освобождается специальная пружина, которая выбрасывает глазок в застекленном отверстии. После срабатывания заменяется цилиндр со сгоревшей плавкой вставкой и сигнализирующее устройство.

8.4.3. Предохранители с жидкометаллическими контактами

В предохранителе с жидкометаллическими контактами (рис. 8.7) электроизоляционная труба имеет капилляр, заполненный жидким металлом. Он герметично закрыт электродами и корпусом и имеет специальное демпфирующее устройство. При протекании большого тока жидкий металл испаряется, образуется пробка, и электрическая цепь размыкается. После определенного времени поры металла конденсируются, и контакт восстанавливается. Предельный отключаемый ток таких предохранителей достигает 250 кА при $U = 450$ В переменного тока. Предохранители работают многократно с большими токоограничениями.

В таком предохранителе 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.

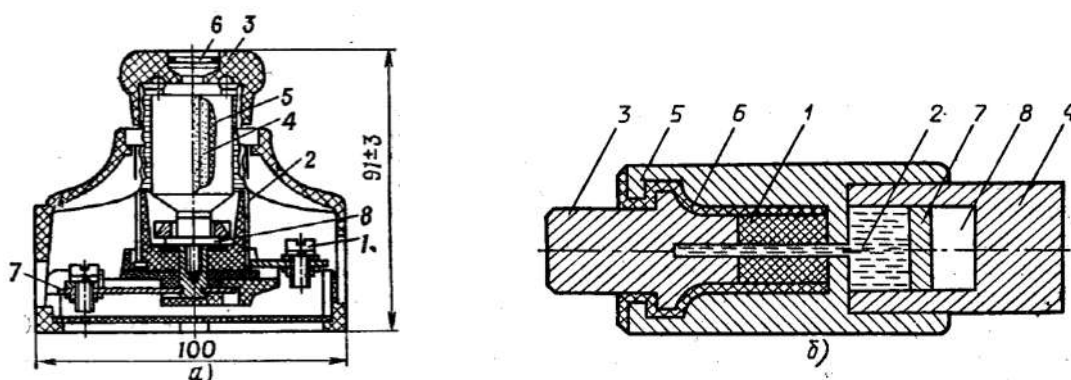


Рис. 8.7. Жидкометаллический предохранитель:

1 – электроизоляционная трубка, 2 – жидкий металл, 3, 4 – электроды, 5 – корпус, 6 – уплотнение, 7, 8 – демпфирующее устройство

8.5. Высоковольтные предохранители

При напряжении выше 3 кВ и частоты 50 Гц применяются высоковольтные предохранители (рис. 8.8). Процесс нагрева плавной вставки у них аналогичен низковольтным.

Требование: длительность плавления вставки должна быть не менее 2 часов при токе перегрузки $2 I_{\text{НОМ}}$, а более 1 часа при $1,3 I_{\text{НОМ}}$.

Высоковольтные предохранители применяются для защиты трансформаторов напряжения от КЗ. Ток, текущий через предохранитель в нормальном режиме не превышает доли ампера. В таких предохранителях время плавления вставки равно 1 мин при 1,25–2,5 А.

Распространены предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.

Предохранители ПК первого типа на напряжение 6–10 кВ – фарфоровый цилиндр, наполненный кварцевым песком. В предохранителях до 7,5 А медная плавкая вставка наматывается на керамический рельефный каркас. Это позволяет увеличить длину вставки и эффект токоограничения, а следовательно, повысить отключаемый ток.



Рис. 8.8. Высоковольтные предохранители

При номинальных токах выше 7,5 А плавкая вставка выполняется в виде параллельных спиралей. Это позволяет увеличить номинальный ток до 100 А при $U = 3$ кВ.

Для работы на открытом воздухе при $U = 10$ и 35 кВ и отключаемом токе до 15 кА применяют стреляющие предохранители типов ПСН-10 и ПСН-35.

При перегорании вставки образуется дуга, которая, соприкасаясь со стенками трубки, разлагает их, и образующийся газ поднимает давление в трубке. Процесс отключения сопровождается сильным выбросом пламени, газов и стреляющим звуковым эффектом. Поэтому предохранители соседних фаз должны быть на значительном удалении друг от друга.

8.6. Выбор, применение и эксплуатация предохранителей для защиты электродвигателя и полупроводниковых устройств

Выбор плавкой вставки предохранителя осуществляется по условиям длительной эксплуатации и пуска.

1. Если условия пуска лёгкие, то номинальный ток вставки выбирается по пусковому току нагрузки

$$I_{\text{в.ном}} = 0,4 \cdot I_{\text{п}}, \quad (8.1)$$

где $I_{\text{п}}$ – пусковой ток асинхронного двигателя с КЗ ротором.

2. Для тяжёлых условий пуска, когда двигатель медленно разворачивается (привод центрифуги), или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски происходят с большой частотой

$$I_{\text{в.ном}} = (0,5 \div 0,6) \cdot I_{\text{п}}. \quad (8.2)$$

3. Если предохранитель стоит в линии, питающей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по формуле

$$I_{\text{в.ном}} = 0,4 [I_{\text{р}} + (I_{\text{п}} - I_{\text{ном. дв}})], \quad (8.3)$$

где $I_{\text{р}}$ – расчётный номинальный ток линии, равный $\Sigma I_{\text{ном}}$. Разность $I_{\text{п}} - I_{\text{ном. дв}}$ берётся для двигателя, у которого она наибольшая.

4. Для двигателя с фазным ротором, если $I_{\text{п}} \leq 2 I_{\text{ном. дв.}}$, плавкую вставку можно выбирать по условию

$$I_{\text{в.ном}} = (1,0 \div 1,25) I_{\text{ном. дв}}. \quad (8.4)$$

5. Выбранные предохранители надо проверить на КЗ непосредственно у двигателя. Берётся двухфазное КЗ при изолированной нейтрали и однофазное КЗ на землю, если нейтраль заземлена. Для правильной работы необходимо

$$I_{\text{в.ном}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{в.ном}}} \geq 3 \div 4, \quad (8.5)$$

где $I_{\text{к}}$ – ток КЗ у двигателя; $I_{\text{в.ном}}$ – номинальный ток плавкой вставки у двигателя.

Значение I_K зависит от активного и реактивного сопротивления источника питания (трансформатора) и питающих линий.

Для двухфазного КЗ:

$$I_{K2} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2Z_{\Phi}}; \quad (8.6)$$

для однофазного КЗ:

$$I_{K1} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}Z_{\Phi}}; \quad (8.7)$$

для трёхфазного КЗ:

$$I_{K3} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}Z_{\Phi}}. \quad (8.8)$$

Сопротивления фаз Z_{Φ} и $Z_{\Phi 0}$ определяются уравнениями

$$Z_{\Phi} = \sqrt{(\sum R_{\Phi} + R_T)^2 + (\sum X_{\Phi} + X_T)^2}; \quad (8.9)$$

$$Z_{\Phi 0} = \sqrt{(\sum R_{\Phi} + R_{\Phi 0})^2 + (\sum X_{\Phi} + X_{\Phi 0})^2} + Z_{T1},$$

где R_{Φ} и X_{Φ} – активное и индуктивное сопротивления проводников фазы; $R_{\Phi 0}$ и $X_{\Phi 0}$ – то же нулевого провода; R_T и X_T – то же фазы трансформатора; Z_{T1} – полное расчётное сопротивление трансформатора при замыкании на землю.

Контрольные вопросы

1. Перечислите назначение, принцип действия и устройство предохранителя.
2. Назовите основные параметры предохранителя.
4. Назовите, в чем отличие конструкции высоковольтных предохранителей от предохранителей низкого напряжения.
5. Назовите предохранители с гашением дуги в закрытом объёме.
6. Назовите предохранители с мелкозернистым наполнителем.
7. Назовите предохранители с жидкометаллическим контактом.
8. Назовите условия выбора предохранителя для защиты электродвигателя.

ГЛАВА 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

9.1. Назначение, классификация и область применения автоматов

Назначение автоматов. Автоматы предназначены для проведения тока в нормальных режимах и автоматического отключения защищаемой цепи при перегрузках, КЗ, чрезмерного понижения питания, а также оперативных нечастых отключений.

Классификация автоматов. Конструкции, характеристики и защитные функции автоматов весьма разнообразны, однако по назначению и принципам работы они могут быть разделены на выключатели общего назначения, быстродействующие и специальные.

Автоматы общего назначения по роду тока цепи выполняются переменного, постоянного, переменного и постоянного тока.

По собственному времени отключения выключатели могут быть токоограничивающими и нетокоограничивающими.

Токоограничивающий выключатель – выключатель, у которого собственное время отключения таково, что в данной цепи за это время ток не успевает достигнуть установившегося значения $I_{кз}$ и отключаемый ток $I_{откл}$ меньше того, который был бы в случае отсутствия выключателя или при нетокоограничивающем выключателе.

Нетокоограничивающие выключатели могут быть с выдержкой токов в цепи КЗ или без нее.

Первые предназначены для осуществления селективной защиты, суть которой заключается в том, что при токе $I_{кз}$, превосходящем ток установки $I_{уст}$ выключателей всех ступеней, отключается ближайший к месту аварии участок, у которого выключатель имеет меньшую выдержку времени t_1 ($t_1 < t_2 < t_3$).

Собственное время размыкания выключателей – 0,02–0,08 с.

В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся на:

- максимальные 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);
- неполяризованные, реагирующие на возрастание тока в любом направлении.

Для построения селективно действующей защиты автоматы 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.

По защитным характеристикам собственное время размыкания быстродействующего выключателя в зависимости от тока отключения и крутизны его нарастания регламентированы ГОСТ 25581-81Б:

1 класс – до 0,008 с;

2 класс – до 0,005 с;

3 класс – до 0,002 с.

Область применения автоматов. Автоматы общего и бытового назначения применяются для максимальной токовой защиты. В эксплуатации характеристики автомата не могут быть изменены.

Универсальные автоматы применяются для комбинированной защиты: максимальной защиты по току и минимальной по напряжению.

Выключатели автоматические быстродействующие применяются для защиты полупроводниковых преобразователей, электрических машин и машин постоянного тока при КЗ, перегрузках и обратных токах в промышленных установках (например, в электроприводах прокатных станов) и в установках магистрального, промышленного и городского электрифицированного транспорта.

9.2. Требования, предъявляемые к автоматам

К автоматам предъявляются следующие требования.

1. Токоведущая цепь автомата должна пропускать ток $I_{ном}$ в течение сколь угодно длительного времени. Режим продолжительного включения для автоматов является нормальным. Токоведущая цепь автоматов может подвергаться воздействию больших токов КЗ как при замкнутых контактах, так и при включении на существующее КЗ.

2. Автомат должен обеспечивать многократное отключение токов КЗ, которые могут достигать сотен кА. После отключения этих токов автомат должен быть пригоден для длительного пропускания тока $I_{ном}$.

3. Для обеспечения электродинамической и термической стойкости электрооборудования, уменьшения разрушения и других последствий, вызываемых токами КЗ, автоматы должны иметь малое время отключения.

4. Элементы защиты автомата должны обеспечивать необходимые токи и времена срабатывания и селективность.

9.3 Узлы автомата и принцип его действия

Внешний вид автоматического выключателя приведен на рисунке 9.1.



Рис. 9.1. Внешний вид автоматического выключателя

В любом автомате есть следующие основные узлы:

- токоведущая цепь,
- дугогасительная камера,
- привод автомата,
- механизм автомата,
- механизм свободного расцепления автомата,
- элементы защиты расцепителей.

В автомате на ток > 200 А (рис. 9.2) токоведущая цепь имеет главные 1 и дугогасительные контакты 3.

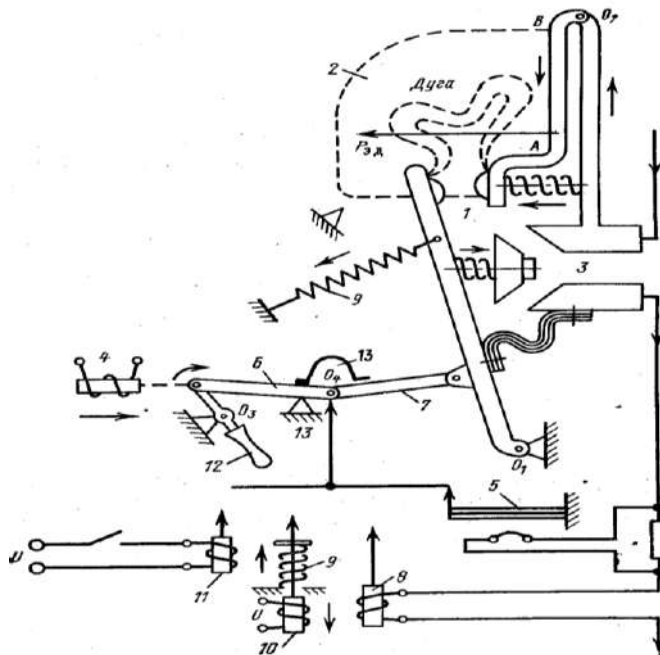


Рис. 9.2. Принципиальная схема автомата. 1 – дугогасительные контакты, 2 – камера дугогашения; 3 – главный контакт; 4 – электромагнит; 5, 8, 10, 11 – электромагнитные расцепители; 6, 7 – рычаги (звенья) механизма свободного расцепления; 13 – упор; 9 – пружина

Включение автомата может производиться вручную рукояткой 12 или электромагнитом 4. Звенья 6, 7 и упор 13 образуют механизм свободного расцепления. Отключение 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. Модульный автомат имеет подобную конструкцию (рис. 9.3).

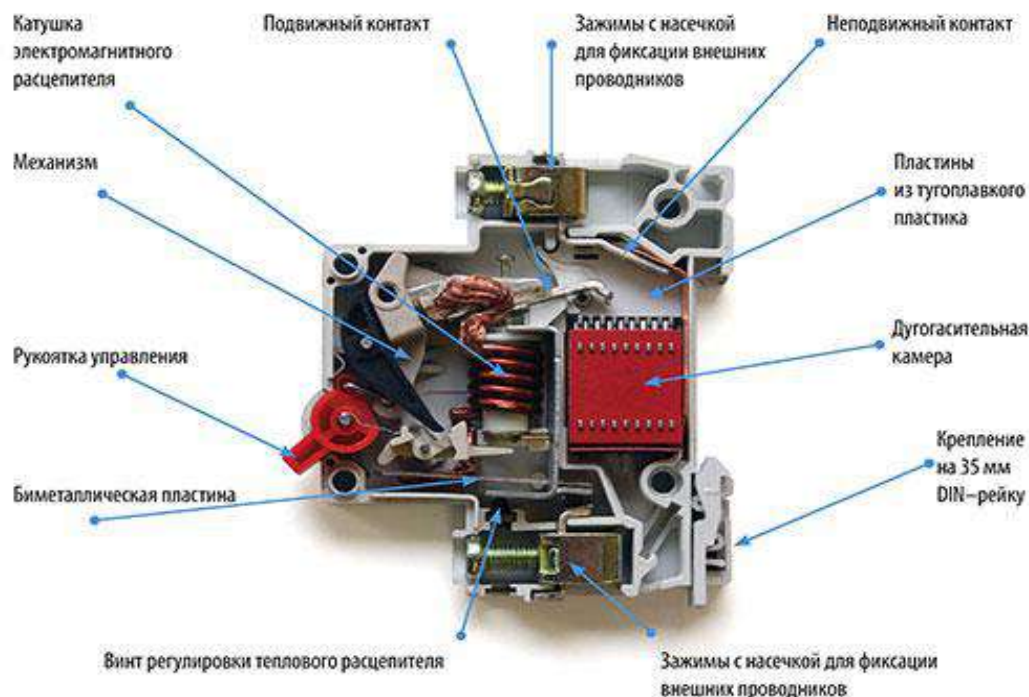


Рис. 9.3. Составные элементы модульного автоматического выключателя

9.4. Основные параметры автомата

1. Собственное и полное время отключения.
2. Номинальный длительный ток: $I_{\text{ном}}$.
3. Номинальное напряжение: $U_{\text{ном}}$.
4. Предельный ток отключения.

Под *собственным временем отключения автомата* понимают время от момента, когда ток достигнет значения тока срабатывания $I_{\text{ср}}$, до начала расхождения его контактов. После расхождения контактов возникающая дуга должна быть погашена за минимальное время с перенапряжением не представляющим опасности для остального оборудования.

Автоматические выключатели изготавливаются в стационарном и выдвижном исполнении.

9.5. Универсальные и установочные автоматы

Выключатели изготавливаются в основном на токи от 6,3 А до 6300 А и U до 1000 В переменного тока и 440 В постоянного тока в соответствии со стандартизованными шкалами токов и напряжений.

Автоматы серии А-3700. $I_{\text{ном}} = 160\text{--}630\text{А}$ при $\sim U$ до 660 В и постоянном до 440 В. $I_{\text{доп.КЗ}} = 200\text{ кА}$. Износостойкость $(5\text{--}10) \cdot 10^3$ циклов. Автомат может снабжаться электромагнитным приводом для дистанционного управления.

Выключатели серии ВА51 и ВА52. Серии выполняются на токи 63–630 А, U до 660 В \sim тока частотой 50 и 60 Гц и до 440 В постоянного тока с многообразием модификаций по набору и сочетанию расцепителей. Привод ручной или двигательный.

Выключатели серии ВА53, ВА55 и ВА75 по конструкции представляют собой продолжение серии ВА51 в сторону больших токов (до 4000 А) при тех же напряжениях. В этих сериях применяются полупроводниковые максимальные расцепители. Отключаемый ток до 135 кА при 380 В и 160 кА при 440 В.

Выключатели на напряжение 1140 В. Такой выключатель (серии А3790) разработан на базе А3700 на ток 630 А с предельно допустимым током КЗ 25 кА при 1140 В, 12 кА при 660 В переменного тока и 50 кА при 440 В постоянного тока. Механическая износостойкость – 16000 циклов, коммутационная износостойкость при 1140 В – 600 циклов, а при 660 В – 1000 циклов.

9.6. Быстродействующие автоматы

Достижение времени отключения 0,002–0,008 с требует специальных мероприятий и других принципов работы приводных электромагнитов. В известных конструкциях применяются следующие способы получения быстродействия:

1) по принципу вытеснения потока (быстродействие 0,003–0,005 с). Отключение автомата осуществляется вытеснением потока из участка сердечник-якорь. При этом размагничивающий поток создается форсированно током КЗ;

2) механических защелок (замков) t_0 до 0,002 с. Включение также осуществляется кратковременно работающим электромагнитом, а удержание во включенном положении – механической (электромеханической) защелкой. Освобождение защелки производится отключающим электромагнитом, работающим в форсированном режиме, создаваемом током КЗ;

3) системы с ударным электромагнитом – работающий с большой форсировкой электромагнит создает «ударную силу», превосходящую силу удерживающего электромагнита и «отрывает» якорь, т.е. отключает выключатель;

4) выключатель с взрывным расцепителем – время отключения 0,001 с – не получили распространения из-за своей сложности;

5) вакуумные выключатели, обеспечивающие гашение дуги $t_0 = 0,003\text{--}0,007$ с. Примеры исполнения некоторых выключателей приведены ниже.

Выключатель БВП-5. Построен на принципе вытеснения магнитного поля. Он предназначен для защиты силовой цепи электровозов постоянного тока. $U_{\text{ном}} = 4000$ В, $U_{\text{max}} = 4000$ В, $I_{\text{ном}} = 1850$ А, собственное время отключения – 0,003с.

Выключатель постоянного тока вакуумный типа ВПТВ-15-5/400 на $U_{\text{ном}} = 15$ кВ, $I_{\text{ном}} = 400$ А, $I_{\text{откл}} = 5$ кА.

Автомат серии ВАБ – 28 наиболее универсальный, $I_{\text{ном}} = 1,5\text{--}6$ кА, $U = 825\text{--}3300$ В.

9.7. Автоматы для гашения магнитного поля мощных генераторов

При неисправностях (пробой изоляции, внутреннее замыкание и т.п.) в обмотках электрических машин необходимо как можно быстрее погасить магнитное поле возбуждения машины. Эту задачу осуществляют выключатели гашения магнитного поля, отключая обмотку возбуждения от источника питания. Широкое распространение получил способ гашения поля путем разряда обмотки возбуждения на переменный или постоянный резистор.

Автоматы АГП выполняются на $I_{\text{ном}} = 1200, 1600, 3200, 4000$ и 6000 А.

9.8. Выбор, применение и эксплуатация автоматических воздушных выключателей

1. Номинальное значение напряжения $U_{\text{ном.а}}$ и тока $I_{\text{ном.а}}$ автомата, ток нагрузки $I_{\text{ном.н}}$ и напряжения сети $U_{\text{ном.с}}$ должны удовлетворять соотношениям

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{ном.с}}; \quad I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{ном.с}}. \quad (8.9)$$

2. Для автомата защиты двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток расцепителя принимается равным току двигателя в режиме ПВ = 25 %.

3. Для автоматов защиты двигателей с КЗ ротором ток уставки электромагнитного расцепителя

$$I_{уст.эм.} \geq (2,5 \div 3,0) I_{ном.дв.} \cdot$$

4. Для группы короткозамкнутых двигателей

$$I_{уст.эм.} \geq (1,5 \div 1,8) \left[\sum I_{ном.дв.} + (I_{п} + I_{ном.дв.}) \right] \quad (9.1)$$

где разность $(I_{п} - I_{ном.дв.})$ берется для двигателей, у которых она наибольшая.

5. Для двигателя с фазным ротором

$$I_{уст.эм.} \geq (2,5 \div 3,0) I_{ном.дв.} \cdot \quad (9.2)$$

6. Для группы двигателей с фазным ротором

$$I_{уст.эм.} \geq (1,5 \div 2,0) I_{ном.дв.}^* + \sum I_{ном.дв.}, \quad (9.3)$$

где $I_{ном.дв.}^*$ – ток двигателя с наибольшим пусковым током.

7. Для двигателей, работающих в тяжелом или повторно-кратковременном режиме, номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя

$$I_{ном.расц} \geq 1,5 \cdot I_{ном.дв.} \cdot$$

8. Выбор по току КЗ :

а) для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$\frac{I_{кз}}{I_{уст.эм.}} \geq 1,25 \div 1,4;$$

б) для автоматов с комбинированным расцепителем

$$\frac{I_{\text{кз}}}{I_{\text{н.расц}}} \succ 3. \frac{I_{\text{кз.}}}{I_{\text{уст.эм.}}} \geq 1,25 \div 1,4.$$

9. Предельный ток отключения автомата $I_{\text{откл.авт}}$ должен быть не менее тока $I_{\text{к}}$.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы автоматических выключателей.
2. Перечислите основные параметры автоматического выключателя.
3. Перечислите требования, предъявляемые к автоматическим выключателям.
4. Какое время отключения имеет быстродействующий автомат?
5. Назовите критерии выбора автоматических выключателей.

ГЛАВА 10. КОММУТАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

10.1. Кнопки управления

Кнопки управления служат для коммутации низковольтных электрических цепей. Они бывают одноцепные и двухцепные с замыкающими и размыкающими контактами. В большинстве случаев кнопки делаются с самовозвратом, то есть при снятии механического давления их контакты возвращаются в исходное положение. На рис. 10.1 показана конструкция кнопки с двумя парами контактов – замыкающими и размыкающими.

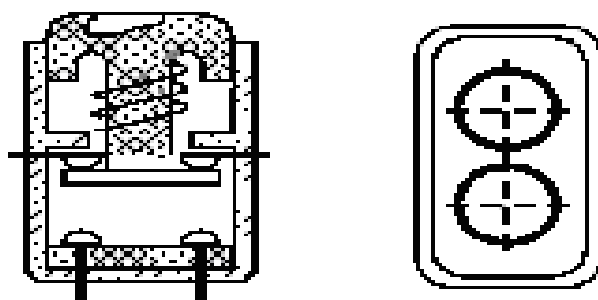


Рис. 10.1. Кнопка управления

Кнопки управления различаются по числу и типу контактов (от 1 до 4 замыкающих и размыкающих), форме толкателя (цилиндрический, прямоугольный и грибовидный), надписям и цвету толкателя, а также способу защиты от воздействия окружающей среды (открытие, закрытие, герметичные, взрывобезопасные).

Независимо от конструкции и габаритов, все кнопки имеют неподвижные и подвижные контакты, перемещаемые с помощью толкателя. Кнопки могут быть с нажимаемыми (рис. 10.2а) и поворотные (рис. 10.2б).

Кнопки управления общепромышленного применения серий КУ, К-20 и КЕ имеют различные исполнения.

Промышленностью выпускаются специальные кнопки (ВК 14-21), предназначенные для коммутации цепей электроники. Эти малогабаритные кнопки выполняются на основе микровыключателя типа МП,

которые используются в качестве исполнительного контактного элемента тумблера типа МТ1 и МТ11.

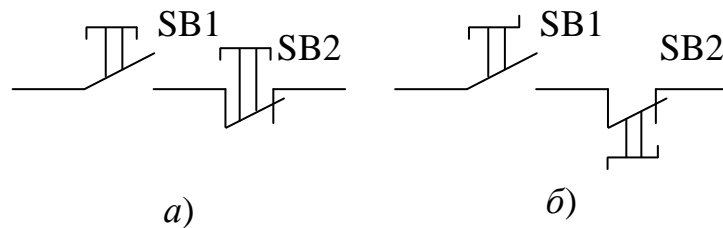


Рис. 10.2 Условные обозначения кнопок:
 а) нажимные кнопки; б) поворотные кнопки

Основные факторы выхода кнопок из строя – механические повреждения, повышенная токовая перегрузка, вредные воздействия окружающей среды.

Отключающая способность кнопочных элементов – до 80–100 Вт постоянного тока и до 1500 ВА переменного тока. Электрическая износостойкость – не менее 200000 отключений, механическая износостойкость – не менее 100000 циклов. Номинальный ток кнопок – 2,5; 5; 6; 10 А.

Следует иметь в виду, что при проектировании схем управления целесообразно непосредственное отключение цепи производить не кнопкой, а другим более мощным электрическим аппаратом.

10.2. Переключатели

Переключатели — это контактные коммутационные аппараты, предназначенные для переключения электрических цепей.

В распределительных устройствах до 1 кВ и в слаботочных цепях автоматики широкое применение получили пакетные переключатели и выключатели. На рис. 10.3 показан пакетный кулачковый выключатель.

На основании выключателя укреплены два пакета *I* и *II*, внутри которых расположены по три полюса контактных систем. При повороте рукоятки 9 поворачиваются вал 2 и кулачок 3. Если шток 5 попадает в выемку кулачка, то контакты 7, 8 замыкаются под действием пружины 6. Если шток попадает на выступ кулачка, то контакты размыкаются.

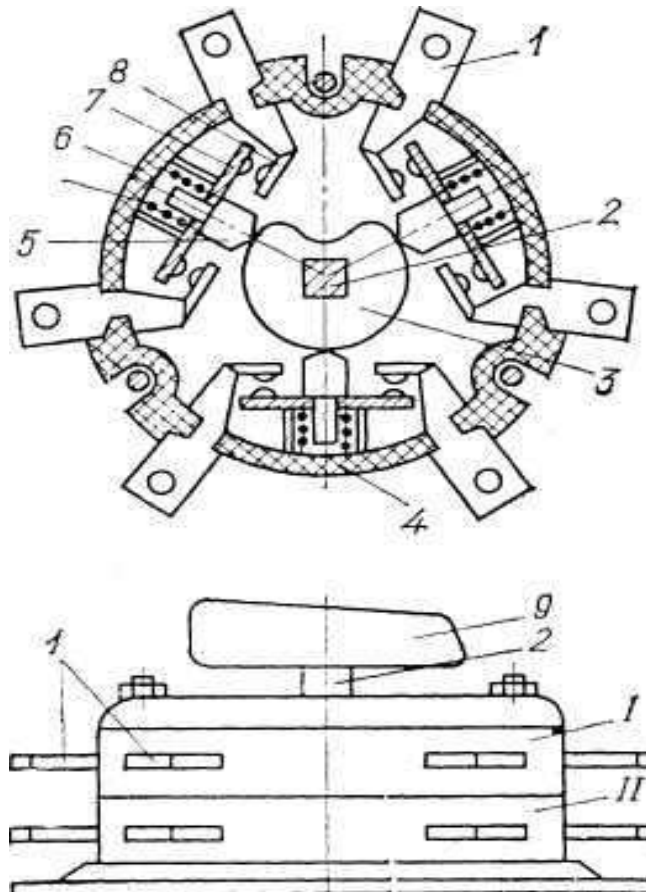


Рис. 10.3. Пакетный кулачковый выключатель

Возникшая дуга гасится в закрытом объеме герметизированного корпуса 4 из изоляционного материала. Внешняя сеть подключается к выводам 1.

Пакетные переключатели имеют малые габариты, удобны в монтаже, исключается выброс пламени и газов. Контактная система позволяет управлять одновременно большим количеством цепей. Такими переключателями разрешается отключать номинальные токи.

Пакетные выключатели не обеспечивают видимого разрыва цепи, поэтому в некоторых цепях устанавливают рубильники.

10.3. Рубильники

Рубильники предназначены для ручного включения и отключения цепей постоянного и переменного тока до 1000 В. По конструкции различают одно-двух- и трехполюсные рубильники. На рис. 10.4 показан рубильник с рычажным приводом.

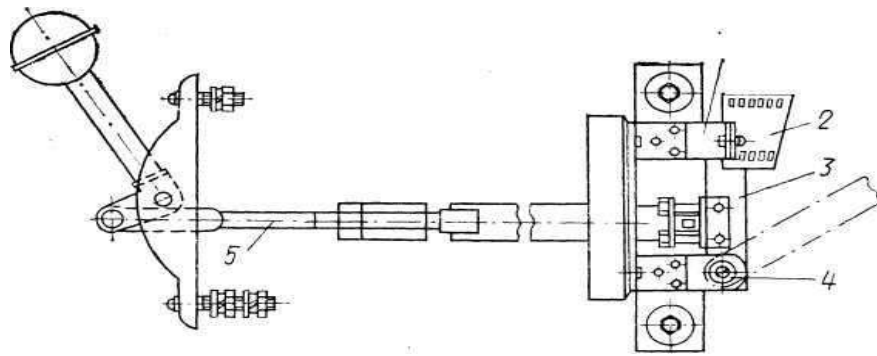


Рис. 10.4. Рубильник с рычажным приводом

Подвижный контакт-нож 3 вращается в шарнирной стойке 4, создавая разрыв с неподвижным контактом 1. Дугогасительная камера 2 обеспечивает гашение дуги. Ножи всех полюсов объединены изоляционным валиком, движение которому передается тягой 5. Рукоятка монтируется на передней стороне шкафа, а контактная часть – внутри шкафа. Таким образом, операции с рубильником безопасны для персонала. Подобным рубильником можно отключать номинальный ток в установках 380 В и 50% номинального тока в установках 500 В.

В зависимости от электрических параметров и выполняемых функций рубильники различаются:

- по габаритным размерам – на номинальные токи от 100 до 630 А;
- по схемам – однополюсные (=), двухполюсные (=) и трех полюсные (~);
- по конструктивному исполнению – с передним и задним присоединением;
- с центральной и боковой рукояткой привода;
- с дугогасительными камерами и вспомогательными контактами, используемыми для целей контроля и сигнализации положения рубильника, в схемах управления.

Рубильник состоит из неподвижных и подвижных контактов, выполненных в виде ножей из меди или латуни. При включении рубильника его ножи плотно входят в неподвижные пружинящие контакты (губки).

Разновидностью рубильников являются переключатели на два рабочих и одно нейтральное положения.

При помощи рубильников можно производить пуск электрических двигателей малой мощности с небольшим числом включений в час.

В схемах автоматического управления электроприводами рубильники, главным образом, используются для снятия напряжения со схемы при осмотрах, ремонтных работах или при остановке привода на длительное время.

Применение дугогасительных камер позволяет использовать рубильники не только в качестве разъединителей (коммутация без тока), но и для коммутации под нагрузкой.

Рубильники без дугогасительных камер способны коммутировать цепи с токами, не превышающими 10% и 30% номинального значения соответственно для постоянного и переменного тока.

Для защиты персонала рубильники закрывают кожухом или размещают в электрошитовом шкафу.

10.4. Аппараты для коммутации цепей управления

Коммутация цепей управления – более частая операция, чем коммутация силовых цепей. Для всех этих операций используют включатели и переключатели различных исполнений, расположенные на панелях, постах, пультах управления. Это одно- и многоцепные аппараты с двумя и более положениями. Коммутация цепей управления для включения и выключения релейно-контакторной аппаратуры осуществляется кнопками управления.

10.5. 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 проводом. Частный случай путевого переключателя – конечный (концевой) выключатель, обеспечивающий коммутацию сигнальных цепей только в крайних положениях хода рабочего органа.

Контактные путевые переключатели делятся на кнопочные и рычажные.

В кнопочном переключателе контролируемый рабочий орган воздействует на шток кнопочного элемента, при этом размыкание и замыкание контактов происходит со скоростью перемещения контролируемого органа.

При скорости штока меньше 0,4 м/мин необходимо применять выключатели с повышенным быстродействием, обеспечивающим необходимую скорость размыкания контактов.

При требовании остановки рабочего органа с высокой точностью $(0,3-0,7) \cdot 10^{-3}$ м применяют путевые (конечные) микропереключатели, например, серии ВМК – ВЗГ (включаемый ток 2,5 А при $U_{\text{н}} = 220$ В, $U_{\text{н}} = 380$ В). При больших ходах рабочего органа и больших токах применяют рычажные переключатели. Благодаря наличию пружины, замыкания и размыкания контактов происходит с большей скоростью, не зависящей от скорости движения ролика. Это дает возможность отключить токи до 6 А при $U_{\text{н}} = 220$ В.

Контактные путевые переключатели обеспечивают точность срабатывания $\pm 0,02-0,05$ мм при износостойкости до $(5-6) \cdot 10^6$ переключений, и благодаря простоте конструкции, находят широкое применение. Условные обозначения путевых и конечных выключателей приведены на рис. 10.5.

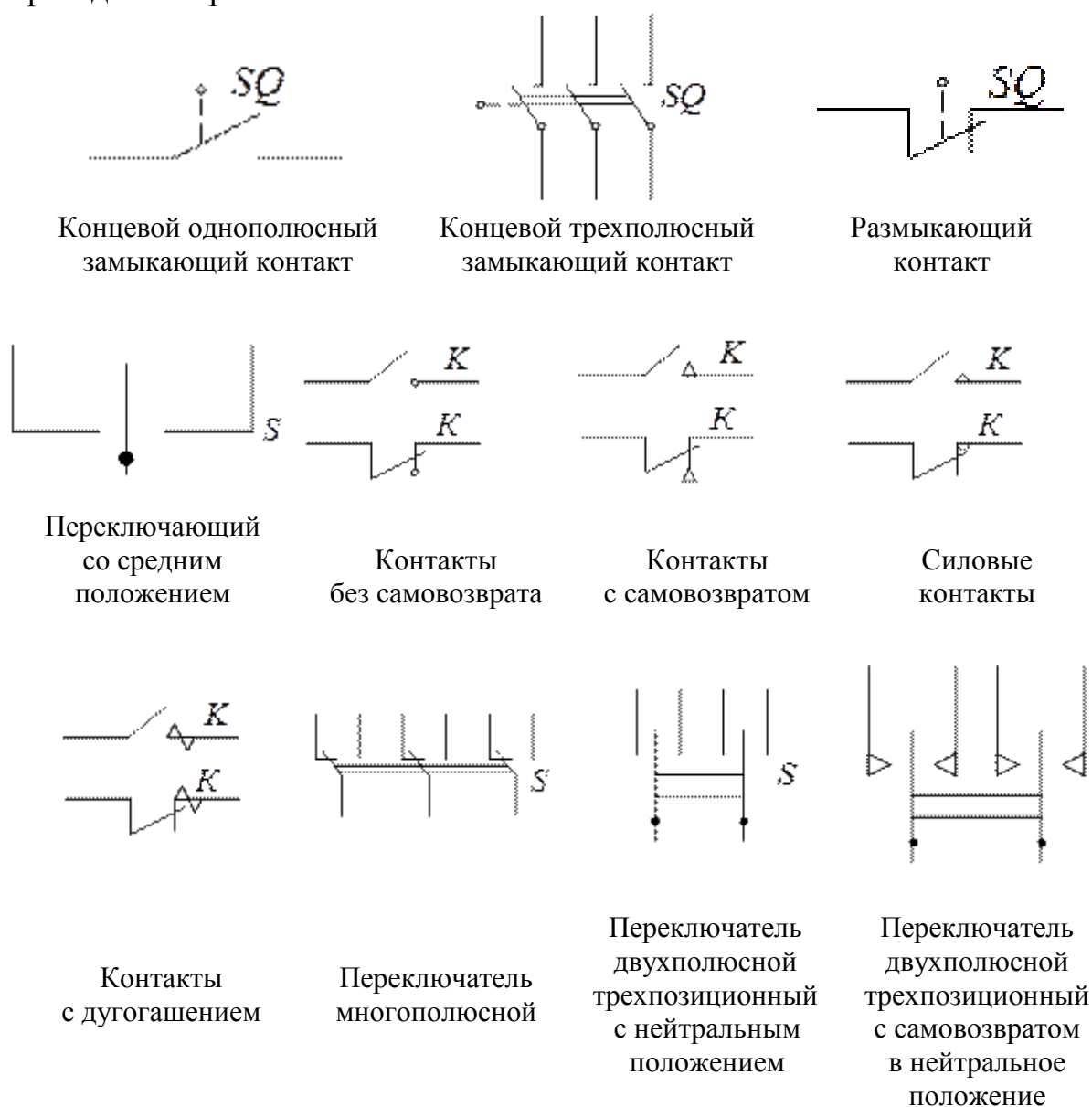


Рис. 10.5. Условные обозначения путевых и конечных выключателей

10.6. Командоконтроллеры

Командоконтроллеры используются для управления электрическим двигателем, работающим в напряженном режиме. Наибольшее распространение получили кулачковые. Принцип их действия аналогичен силовым кулачковым контроллерам, но габариты значительно меньше, а контакты – маломощные без дугогашения. Выпускаются на разное число коммутируемых цепей и положений, с ручным и ножным управлением.

С помощью мостикового контакта в отключаемой цепи создаются два разрыва, что облегчает гашение дуги. Ток отключения командоконтроллера в 4 раза больше кнопочного. Допустимый длительный ток – КК – 10–15 А, ток включения – 50–75 А, отключаемый постоянный ток при индуктивной нагрузке – 0,5– 2,5 А при $U_{\sim} = 440\text{--}110\text{ В}$, отключаемый \sim ток 10 А при U_{\sim} до 500 В. Число коммутируемых цепей – от 4 до 12.

Командоконтроллеры коммутируют цепи катушки управления силовых аппаратов. Для увеличения отключающей способности контактной системы контроллеры могут снабжаться дугогасительным устройством с магнитным дутьем. Более современные – кулачковые командоконтроллеры.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение, состав и общее устройство кнопок управления?
2. Каково назначение, состав и общее устройство переключателей?
3. Каково назначение, состав и общее устройство рубильников?
4. Каково назначение, состав и общее устройство переключателей?

ГЛАВА 11. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Большинство электрических аппаратов имеет в своём составе электромагнит. Конфигурация магнитной цепи электромагнита зависит от назначения аппарата и может быть самой разной. Рассмотрим магнитную цепь простейшего электромагнитного механизма (ЭММ) (рис. 11.1).

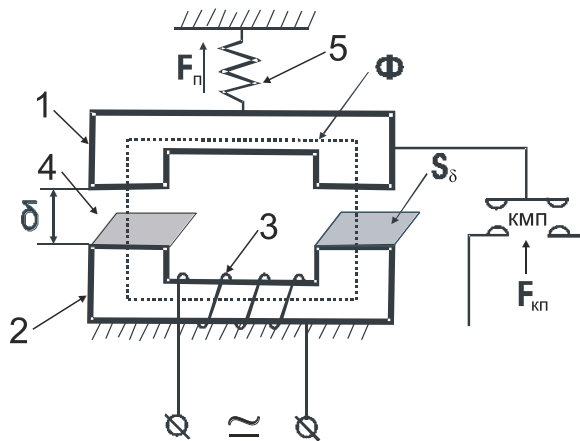


Рис. 11.1. Магнитная цепь простейшего электромагнитного механизма

Магнитная цепь включает:

- якорь (1), подвижную часть ЭММ, механически связанную с тем, что необходимо переместить, перевернуть, например, с контактом магнитного пускателя КМП;
- сердечник (2), жёстко закрепленную неподвижную часть ЭММ, на которой сидит намагничивающая обмотка (3);
- воздушный (рабочий) зазор (4) размером δ и площадью S_δ .

Кроме того, в состав ЭММ входит возвратная пружина (5), действующая на якорь силой F_n .

При подаче напряжения на катушку создается магнитодвижущая сила $F_{мдс}$, под действием которой возбуждается магнитный поток Φ . Якорь намагничивается и притягивается к полюсам сердечника с силой магнитного притяжения F_m .

$$F_m = \frac{\Phi_\delta^2}{2\mu_0 S_\delta} \quad (11.1)$$

где Φ_δ – магнитный поток в рабочем зазоре; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S_δ – площадь сечения воздушного зазора.

Задачей расчета магнитной цепи является либо определение магнитодвижущей силы катушки, необходимой для создания требуемого магнитного потока в рабочем зазоре (прямая задача), либо определение магнитного потока в рабочем зазоре по известной магнитодвижущей силе катушки.

Требуемый магнитный поток в рабочем зазоре определяется из выражения (11.1) при заданной $F_m > F_n$.

Прямая и обратная задачи могут быть решены с помощью двух законов Кирхгофа применительно к магнитной цепи:

1. Алгебраическая сумма потоков в узле магнитной цепи равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0. \quad (11.2)$$

Сумма магнитодвижущих сил в отдельных j частях магнитного контура равна сумме падений магнитных напряжений в этих частях.

$$\sum_{j=1}^n F_{\text{мдс}.j} = \sum_{j=1}^n \Phi_j \cdot R_{\mu j} = \sum_{j=1}^n H_j \cdot l_j, \quad (11.3)$$

где $R_{\mu j}$ – магнитное сопротивление j -о участка; H_j – напряженность магнитного поля j -о участка; l_j – длина j участка.

11.1. Электромагниты постоянного тока

Электромагнитный поток в данной конструкции создаётся обмоткой постоянного тока. Действие не зависит от направления тока.

Тяговая статическая характеристика – зависимость силы магнитного притяжения от величины зазора.

Сила магнитного притяжения обратно пропорциональна величине зазора $F_m = f\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)$. Якорь по мере притягивания двигается с ускорением, сила всё время увеличивается.

Согласование тяговой характеристики с нагрузкой электромагнита производится путём построения в одних осях тяговой характеристики и характеристик противодействующих пружин (рис. 11.2).

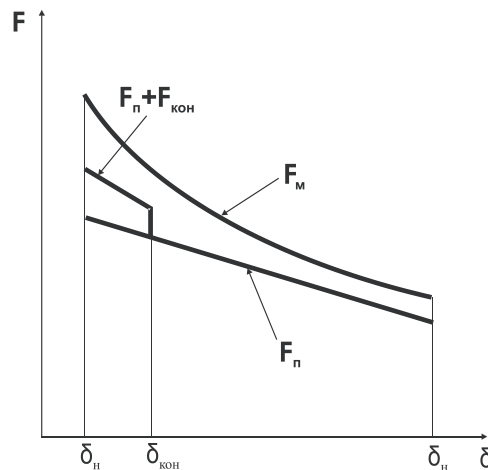


Рис. 11.2. Согласование тяговой характеристики с нагрузкой электромагнита

Такое согласование даёт возможность сделать заключение о работоспособности электромагнита.

Для нормального срабатывания ЭММ необходимо, чтобы тяговая характеристика во всём диапазоне изменения хода якоря (от начального зазора δ_n до конечного δ_k) проходила выше характеристик противодействующих пружин. После замыкания контактов (зазор $\delta_{кон}$) сила магнитного притяжения начинает противодействовать сила контактных пружин $F_{кп}$, сила противодействующих пружин $F_n + F_{кп}$, в этот момент возрастает скачком, а затем монотонно. Для чёткого возврата, отпускания якоря необходимо, чтобы тяговая характеристика проходила ниже противодействующих характеристик. Если будет общая точка, то происходит зависание электромагнита.

Динамика срабатывания электромагнитов постоянного тока показана на рисунке 11.3.

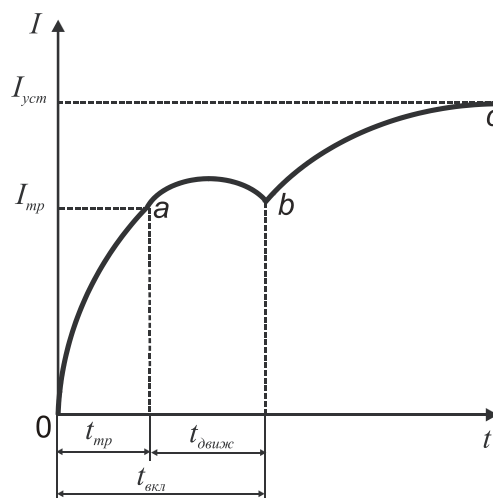


Рис. 11.3. Кривая нарастания тока в катушке при включении электромагнита постоянного тока

Участок 0-а. Ток мал, тяговое усилие электромагнита меньше силы противодействующих пружин, якорь неподвижен. Время от момента приложения напряжения до момента трогания якоря – время трогания на включение t_{mp} .

Участок а-б. Точка а соответствует моменту, когда тяговое усилие электромагнита начинает превышать силы противодействующих пружин. Якорь трогается и движется до момента соответствующего конечному зазору δ_k . Точка б соответствует остановке якоря. Время от момента трогания до момента остановки якоря – время движения $t_{двиг}$.

Участок б-с. Ток катушки нарастает до установившегося значения. $t_{mp} + t_{двиг}$ – время включения.

Отключение электромагнита осуществляется путем обрыва тока в катушке. В зависимости от скорости гашения дуги на контактах выключающего аппарата ток в катушке и магнитный поток будут уменьшаться по некоторой кривой. В некоторый момент времени тяговое усилие электромагнита становится меньше силы противодействующих пружин, якорь начнет двигаться в положение соответствующее начальному зазору δ_n . Время от начала обрыва тока в катушке до момента трогания якоря – время трогания на отключение.

Время от начала момента трогания до остановки якоря – время движения. Время трогания на отключение + время движения – время отключения. В некоторых случаях необходимо замедление или ускорить действие электромагнита. Широко применяется замедлить действия электромагнита при помощи короткозамкнутого витка, имеющего малое электрическое сопротивление (рис. 11.4).

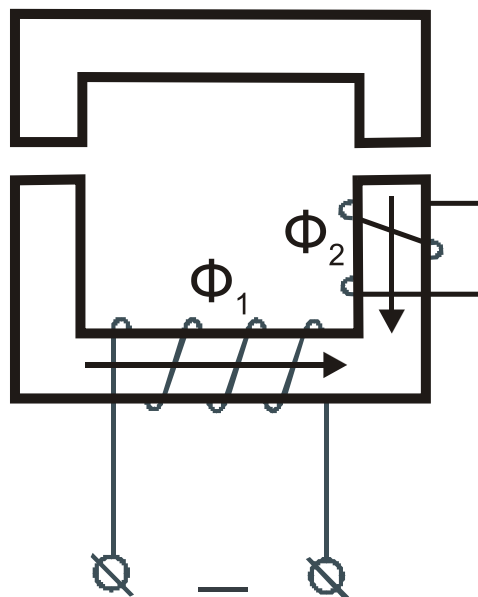


Рис. 11.4. Короткозамкнутый виток

При включении питающей обмотки в магнитной цепи нарастает магнитный поток Φ_1 . Этот поток наводит в короткозамкнутом витке э.д.с. Последняя вызывает ток такого направления, при котором магнитный поток короткозамкнутого витка Φ_2 направлен навстречу потоку Φ_1 . Результирующий поток равен алгебраической сумме этих потоков.

При отсутствии короткозамкнутого витка нарастание магнитного потока Φ и соответствующей ему силы магнитного притяжения F_M происходило бы по кривой 1 (рис. 11.5). При наличии короткозамкнутого витка скорость нарастания суммарного магнитного потока Φ и соответствующей ему силы магнитного притяжения F_M уменьшается и происходит по кривой 2.

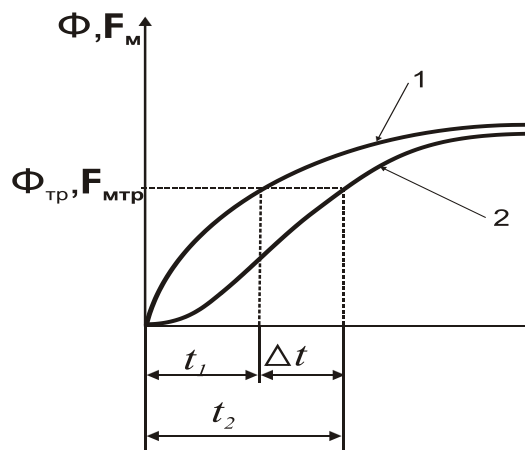


Рис. 11.5. Принцип работы электромагнита постоянного тока с короткозамкнутым витком

При этом поток и сила магнитного притяжения достигнут требуемого для трогания значения через время $t_2 > t_1$. Время включения будет замедленно на время Δt — выдержку времени на включение.

При отключении электромагнита замедляющий эффект выше в 8–12 раз, чем при включении.

11.2. Электромагниты переменного тока

Параметры и характеристики аналогичны электромагнитам постоянного тока. Основное отличие — в характере силы магнитного притяжения. Так как ток, протекающий по катушке, изменяется по синусоидальному закону, то и магнитный поток также синусоидален. Поэтому сила магнитного притяжения также изменяется по гармоническому закону.

Чтобы якорь хорошо притянулся необходимо, чтобы среднее значение F_m было больше силы противодействующих пружин $F_n + F_{kn}$. Но существуют моменты времени, когда $F_m < F_n + F_{kn}$. В результате получается вибрация якоря и шум при работе электромагнита переменного тока.

Контрольные вопросы

1. Как замыкается магнитная цепь простейшего электромагнитного механизма?
2. Каким образом проектируется магнитная цепь?
3. Как производится согласование тяговой характеристики с нагрузкой?
4. Объясните динамику срабатывания электромагнитов постоянного тока.

ГЛАВА 12. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

12.1. Основные определения, классификация. Общие сведения

Реле – это слаботочный электрический аппарат, предназначенный для выполнения логических функций и измерительных функций, в цепях управления с током до 5 А. Имеет упрощенную контактную систему с увеличенным числом контактов при отсутствии дугогасительных устройств.

В реле при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной изначально заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного сигнала) параметра. При этом хотя бы один из этих параметров должен быть электрическим.

Реле может работать в трех режимах:

- режим повторителя: срабатывание происходит при скачкообразном изменении выходной величины до ее максимального значения;
- режим инвертора: ступенчатое уменьшение выходного параметра до минимального уровня;
- режим реле с памятью (режим триггера): достигнутое после срабатывания или отпускания значение выходного параметра сохраняется и запоминается после исчезновения входного сигнала.

Реле позволяет осуществлять определенную последовательность в работе отдельных частей системы.

Классификационные признаки реле – многочисленны.

В зависимости от природы физической величины, на которую реагируют устройства, различают реле:

- электромагнитные ;
- газовые ;
- радиационные ;
- оптические ;
- химические и другие.

В зависимости от назначения:

- коммутационные;
- усилительные;
- контрольные.

Если воздействие на управляемую цепь осуществляется скачкообразным изменением ее индуктивности, емкости или другого параметра, то говорят о бесконтактных реле.

По принципу устройства воспринимающего органа (принципу действия) электрические реле разделяются на:

- электромагнитные;
- электродинамические;
- магнитоэлектрические;
- индукционные;
- электронные;
- полупроводниковые.

По роду тока – реле постоянного и переменного тока.

В зависимости от вида электрического параметра (выходного):

- реле тока;
- реле напряжения;
- реле мощности;
- реле частоты;
- промежуточное реле;
- реле времени;
- дифференциальное реле (реагируют на разность значений входных величин).

По значению потребляемой мощности:

- высокочувствительные реле (до 10 мВт);
- чувствительные реле (до 0,1 Вт);
- нормальные реле (более 0,1 Вт).

По виду контактов:

- точечные;
- линейные;
- плоские;
- ртутные.

По быстродействию:

- сверхбыстродействующие ($t_{\text{ср}}$ и $t_{\text{откл}}$ до 5 мс);
- быстродействующие (5–50 мс);
- нормальные (50–150 мс);
- замедленные (0,15–1 с);
- реле времени (свыше 1 с).

В зависимости от объема и массы различают:

- малогабаритные реле (не более 40 см³; 250 г);
- миниатюрные реле (3,5–8 см³; 10–30 г);
- сверхминиатюрные реле (не более 3,8 см³, 10 г).

По области применения:

- реле управления;
- реле автоматики;
- реле защиты;
- промежуточные реле (используются тогда, когда мощность основного реле не достаточна для воздействия на управляемые цепи).

По способу включения различают:

- первичные реле (включаются непосредственно в управляемую цепь);
- вторичные реле (включаются через измерительные трансформаторы).

По принципу воздействия на управляемую цепь:

- контактные реле;
- бесконтактные реле; выходным параметром является резкое изменение сопротивления, включенного в управляемую цепь.

Разомкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует большое сопротивление управляемой цепи бесконтактного реле. Замкнутому состоянию контактов соответствует малое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле.

По величине разрывной мощности реле делятся на:

- сильноточные реле повышенной мощности: разрываемая мощность превышает 500 Вт, по характеристикам приближаются к контакторам;
- реле нормальной мощности: промежуточные реле, способные коммутировать мощность постоянного тока – до 150 Вт, переменного тока – до 500 ВА;
- слаботочные реле: реле автоматики и связи. Разрывная мощность в цепях постоянного тока – до 50 Вт, в цепях переменного тока – до 120 ВА.

Конструктивно сильноточные реле сходны с контакторами постоянного тока и различаются отсутствием дугогасительных камер и меньшими размерами электромагнитных приводов и контактного узла.

12.2. Электромеханические реле

Такие реле преобразуют непрерывный входной сигнал в дискретный сигнал на выходе. В конструктивном отношении – это электромагнит, воздействующий на контактную систему. При этом механический момент создается пружиной и не зависит от величины сигнала на входе реле.

Основной характеристикой управления реле является характеристика «вход-выход» $y = f(x)$ (рис. 12.1). Входной величиной реле является ток катушки электромагнита, выходной – ток в коммутируемой цепи.

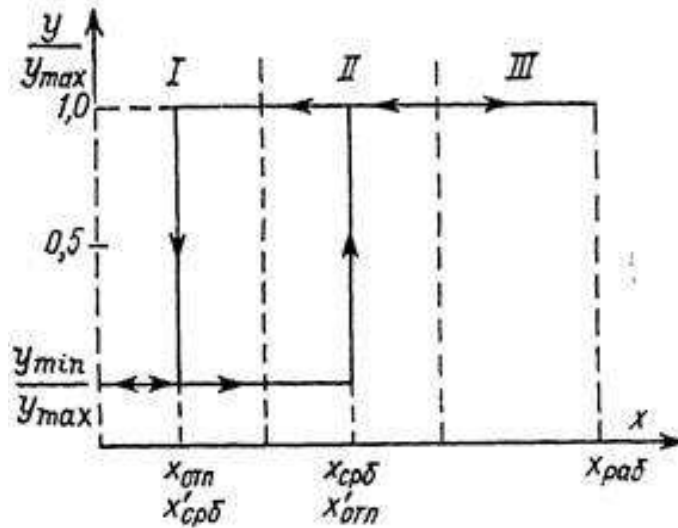


Рис. 12.1. Характеристика управления реле

Значение входного параметра (x), при котором происходит срабатывание реле, называется параметром срабатывания — $X_{ср}$, соответственно параметр отпущения — $X_{отп}$. Время с момента подачи команды на срабатывание до момента начала возрастания выходного параметра называется временем срабатывания — $t_{ср}$. Оно зависит от конструкции реле, схемы его включения, входного параметра. Чем больше значение входного параметра $X_{раб}$ по сравнению с $X_{ср}$, тем быстрее срабатывает реле, так как тяговая характеристика поднимается вверх, а магнитное усилие возрастает.

Отношение $\frac{X_{раб}}{X_{ср}}$ называется коэффициентом запаса для повышения

надежности работы. Следует иметь в виду, что с его ростом возрастает вибрация контактов электромагнитного реле.

Отношение $K_B \frac{X_{отп}}{X_{ср}}$ — коэффициент возврата, всегда меньше

единицы. Этот коэффициент K_B зависит от соотношения тяговой характеристики $F(x)$ и противодействующей характеристики возвратной пружины $F_{пр}(x)$. Усиление действия возвратной пружины уменьшает $X_{отп}$, а, следовательно, K_B уменьшается.

Срабатывание возможно только в том случае, когда тяговая характеристика лежит выше противодействующей. Чем больше их совпадение, тем выше коэффициент возврата K_B . Обеспечить такое совпадение при больших ходах якоря затруднительно. Поэтому у реле

с малым раствором контактов коэффициент возврата выше. Он также увеличивается при уменьшении трения в механизмах реле и гистерезиса материала магнитопровода. Большой коэффициент возврата легче получить в реле ~ тока с Г-образной формой магнитопровода.

Время с момента подачи команды на отключение реле до достижения минимального значения выходного параметра называется временем отключения $t_{\text{откл}}$.

Важным параметром, характеризующим усилительные свойства реле, является отношение \max мощности нагрузки в управляемой цепи $P_{\text{упр}}$ к \min мощности входного сигнала $P_{\text{сраб}}$, при котором происходит срабатывание реле [14].

Коэффициент усиления

$$K_y = \frac{P_k}{P_y},$$

где P_y – мощность управления; P_k – разрывная мощность контактов.

Для контактных реле \max мощность P_y определяется не длительным током, допустимым для данного контакта, а током нагрузки, который может быть многократно отключен.

Функциональные возможности, допустимые режимы работы и область применения реле определяется следующими основными параметрами:

- рабочее напряжение U_n и ток I_n ;
- чувствительность реле (параметры срабатывания $X_{\text{ср}}$ и отпускания $X_{\text{отп}}$);
- коэффициент возврата;
- коэффициент запаса;
- коммутируемая мощность;
- время срабатывания $t_{\text{ср}}$ и отпускания $t_{\text{отп}}$;
- допустимая (максимальная) частота срабатывания, то есть число срабатываний в единицу времени;
- износоустойчивость.

Нормальным считать состояние реле при обесточенной обмотке. Контакты реле: нормально разомкнутые – замыкающие, нормально замкнутые – размыкающие.

12.3. Принцип действия и устройство электромагнитных реле

Электромагнитным реле называется реле, в котором тяговые усилия создаются энергией магнитного поля, возникающего при протекании электрического тока через катушки.

Существует три основных разновидности электромагнитным реле (рис. 12.2):

- 1) нейтральные постоянного тока;
- 2) нейтральные переменного тока;
- 3) поляризованные.

Нейтральным реле постоянного и переменного тока называется такое реле, у которого тяговое усилие на якоре, развиваемое магнитным потоком катушки, не зависит от направления тока в ней.

Нейтральное электромагнитное реле постоянного тока (рис. 12.2а) представляет собой электромагнитный механизм и ряд контактных групп.

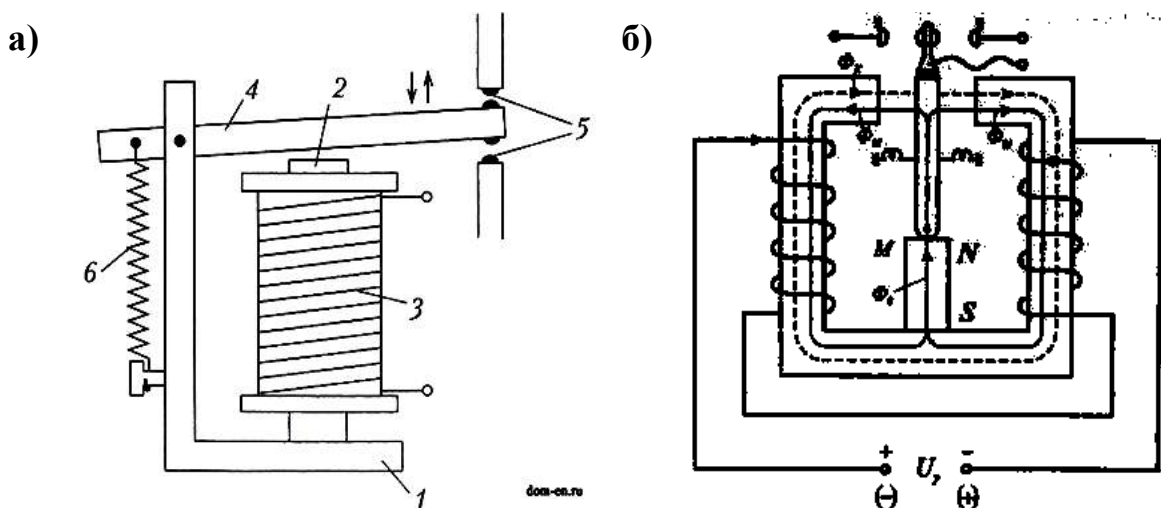


Рис. 12.2. Электромагнитные реле постоянного тока:
а – нейтральное; б – поляризованное реле

Магнитопровод электромагнита состоит из стальных сердечника 2 и подвижного якоря 4. На сердечнике помещается катушка с одной или несколькими обмотками 3. При прохождении по обмотке тока I_y , превышающего ток срабатывания, якорь притягивается к сердечнику и замыкает контакты 5. При отсутствии тока якорь оттягивается от сердечника возвратной пружиной 6. Для предотвращения залипания якоря при $I_y = 0$, на нём устанавливается немагнитная прокладка 1 (основание).

Поляризованные реле (рис. 12.2 б) отличаются от нейтральных электромагнитных реле зависимостью выходного сигнала от полярности входного сигнала, а также более высокими чувствительностью и быстродействием. Их конструктивной особенностью является наличие постоянного магнита, создающего эффект поляризации. В поляризованных реле, в отличие от нейтральных, действуют два независимых друг от друга магнитных потока: поляризующий магнитный поток Φ_0 , создаваемый постоянным магнитом или катушкой подмагничивания, питаемой от независимого источника постоянного тока, и рабочий магнитный поток Φ_p , создаваемый рабочими катушками. Главным их недостатком является малое число выходных (управляемых) цепей.

Существует много разновидностей поляризованных реле. На рис. 12.2 б показано устройство поляризованного реле с дифференциальной магнитной цепью. По магнитопроводу 7 протекают два потока: рабочий поток Φ_p , созданный током I_y в обмотках 1 и поляризующий Φ_0 от постоянного магнита 2. Для указанной полярности напряжения, приложенного к обмоткам, магнитные потоки в левой части магнитопровода складываются, а в правой – вычитаются. Якорь 3 под действием результирующей силы перемещается влево, вызывая замыкание контактов 4 и 5. При изменении полярности напряжения на обмотках результирующий поток будет больше в правой части магнитопровода, что вызывает перемещение якоря вправо и замыкание контактов 5 и 6.

В рассмотренном реле якорь может занимать только два положения – левое или правое. Такое реле является двухпозиционным. Если в конструкцию реле внести пружину, под действием которой якорь будет возвращаться при $I_y = 0$ в среднее положение, то реле станет 3-х позиционным.

В практике наиболее широко распространены реле типа РП, допускающие частоту переключений до 200 в секунду при МДС срабатывания 1–2 А. Длительный ток контактов – 0,2 А; напряжение коммутируемой цепи – 24 В.

В нейтральных реле переменного тока имеет место пульсирующий магнитный поток и, следовательно, возникают потери на гистерезис и вихревые токи, что уменьшает тяговое усилие якоря. Кроме этого, за один период изменения тока тяговое усилие дважды становится равным нулю, что вызывает вибрацию якоря. Для уменьшения вибрации применяют либо реле специального типа (со сдвигом по фазе магнитных потоков, например, реле с КЗ витком), либо обычные реле постоянного тока, параллельно с катушкой которых включён конденсатор большой ёмкости (6–8 мкф).

12.4. Требования, предъявляемые к реле

Для *реле защиты* – селективность, быстродействие, чувствительность, надежность, вторичные реле.

Под селективностью понимают способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы.

Достаточное быстродействие позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах.

Минимальное значение входного параметра, при котором срабатывает реле, называется чувствительностью.

Реле защиты не подвержены воздействию ударов, вибрации, пыли, газов, вызывающих коррозию. Для реле защиты, контролирующих значения тока в узких пределах, коэффициент возврата должен быть возможно ближе к единице.

Реле автоматики имеют самые разнообразные специфические требования. Они работают в тяжелых условиях эксплуатации: возможны удары, вибрации, воздух часто засорен пылью или агрессивными производственными примесями. Число включений в час достигает 1000–1200. Надежность схем автоматики зависит от надежности, в том числе, и реле.

Реле управления – это первичные реле, включаются непосредственно в электрическую цепь и предназначены для частных включений. В таких реле предусматривается возможность регулирования уставок реле. Уставкой реле называется значение параметра, при котором оно срабатывает.

12.5. Реле напряжения, тока, промежуточные реле

Реле напряжения (рис. 12.3) применяются для управления разгоном и торможением электродвигателями постоянного и переменного тока, а также для реализации нулевой защиты по напряжению.



Рис. 12.3. Реле напряжения различного исполнения

Реле тока (рис. 12.4) выполняют функции максимальных, минимальных и реле обратного тока. Минимальные реле применяются, главным образом, для контроля тока в цепях возбуждения машин. Максимальные реле выполняют функции максимальной токовой защиты установок. Катушки токовых реле выполняются на токи 1,5–600 А и включаются всегда последовательно с нагрузкой. Уставка по току осуществляется путем изменения натяжения противодействующей пружины.



Рис. 12.4. Реле тока различного исполнения

Реле напряжения отличаются от токовых только числом и сечением витков катушек и схемой включения в цепь нагрузки: первые – параллельно с нагрузкой, вторые – последовательно с нагрузкой.

Увеличение быстродействия реле напряжения достигается низким номинальным напряжением обмотки (24; 48 В) и последовательным включением добавочного резистора из константана, который позволяет увеличить напряжение срабатывания реле. Его сопротивление выбирается так, чтобы ток срабатывания лежал в пределах $0,3 I_H \leq I_{ср} \leq 0,5 I_H$.

Чем больше отношение $\frac{I_{ср}}{I_H}$, тем больше время срабатывания. Включение добавочного резистора из константана уменьшает зависимость напряжения срабатывания $U_{ср}$ от температуры.

В ряде случаев необходимо контролировать уменьшение выходного параметра. Эту задачу решают с помощью минимальных реле тока или напряжения. При этом, напряжением (током) срабатывания называется напряжение, при котором происходит отпускание якоря, а напряжением (током) возврата – напряжение, при котором якорь притягивается к полюсам электромагнита. Тогда коэффициент возврата $K_B > 1$,

$$K_B = \frac{U_{\text{возвр}}}{U_{\text{сраб}}} = \frac{I_{\text{возвр}}}{I_{\text{сраб}}}. \quad (12.1)$$

Серии реле \approx тока РТ-40, реле напряжения РН-51; РН-53, реле min напряжения РН-54, РЭВ-300 (постоянный ток, реле тока).

Основным элементом реле является электромагнит постоянного или переменного тока. Срабатывают такие реле мгновенно, без выдержки времени.

Реле постоянного тока часто имеет магнитную систему клапанного типа с немагнитной прокладкой, размещаемой между якорем и сердечником, для устранения явления залипания якоря к сердечнику ввиду наличия остаточной индукции в сердечнике.

Вместо токовой катушки в реле может быть установлена катушка напряжения. В этом случае получается реле напряжения.

Ток или напряжение срабатывания реле (установка реле) может регулироваться изменением натяжения возвратной пружины, а также изменением величины зазора между якорем и сердечником.

При затяжке пружины и увеличении зазора параметр срабатывания возрастает. Параметр возврата увеличивается по мере затяжки пружины. Таким образом, коэффициент возврата увеличивается при уменьшении зазора δ .

Реле тока и напряжения с катушками переменного тока выполняются аналогично по конструкции, но магнитная система выполняется шихтованной, а на стержнях сердечника размещаются КЗ витки.

Промежуточное реле (рис. 12.5) – это многоконтактное электромагнитное реле, используемое в сложных схемах автоматического управления, когда возникает необходимость «размножения» контактов какого-либо аппарата, введения различных блокировок и усиление маломощных сигналов. По принципу действия промежуточные реле аналогичны реле напряжения. Их коэффициент возврата и напряжения срабатывания не регулируются.



Рис. 12.5. Промежуточные реле различного исполнения

Промежуточные реле работают от исполнительных органов других реле и предназначаются для усиления и размножения сигналов У таких реле напряжения срабатывания не регулируется, их катушки изготавливаются на 12, 36, 127, 220, 380, 500 В с числом контактов до 8. Число включений в час до 600 при ПВ = 60 %. Имеют прямоходовую магнитную систему $P_{\sim} = 3 \text{ Вт}$; $P_{\sim} = 5 \text{ ВА}$; $4_{\text{н.о}} + 4_{\text{н.з.}}$.

Серия **МКУ-48** как на = ток и на ~ тока.

Серия **РЭП-31** – на ~ тока до 250 В ($U_{\text{кат}} = 5; 6; 12; 15; 24; 60 \text{ В}$).

Серия **ТРПУ-1** – на = токе до 110 В, клапанной тип, $I_{\text{контактов}} = 6 \text{ А}$; $P_{\text{кат}} = 6 \text{ Вт}$; $U_{\text{кат}} = 24; 50; 75; 110 \text{ В}$; $6_{\text{н.о}} + 2_{\text{н.з.}}$ $4_{\text{н.о}} + 4_{\text{н.з.}}$.

Серия **РПУ-4** (универсальная) для управления электрическими приводами. $U_{\text{кат}\sim} = (12 - 440 \text{ В})$; $U_{\text{кат}\sim} = (12-220 \text{ В})$ номинальный и длительно допустимый ток контактов 6 и 10 А.

12.6. Реле времени

Релé вре́мени – реле, предназначенное для создания независимой выдержки времени и обеспечения определённой последовательности работы элементов схемы. Реле времени применяется в случаях, когда необходимо автоматически выполнить какое-то действие не сразу после появления управляющего сигнала, а через установленный промежуток времени. На рисунках 12.6 и 12.7 показаны внешний вид и электрическая схема реле времени.

Существуют множество различных модификаций реле, основные из них:

- с электромагнитным замедлением;
- с пневматическим замедлением;
- с часовым или анкерным механизмом;
- моторные реле времени;
- электронные реле времени.



Рис. 12.6. Реле времени в различных исполнениях

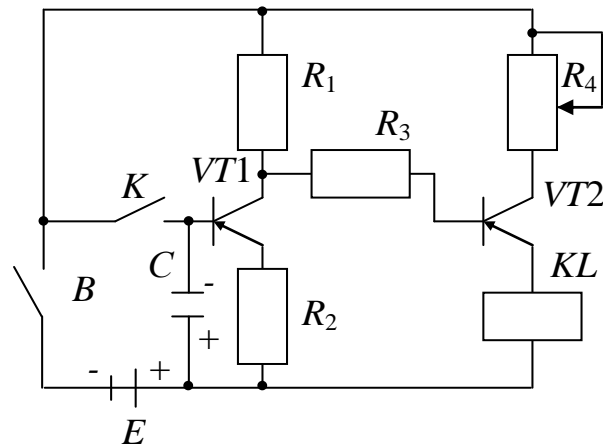


Рис. 12.7. Электрическая принципиальная схема реле времени

12.7. Герконовые реле

Наименее надежным узлом электромагнитного реле является *контактная система*. Электромагнитная дуга приводит ее к быстрому разрушению. Этому также способствуют окислительные процессы и покрытие контактных поверхностей слоем пыли, влаги, грязи.

Существенным недостатком электромагнитного реле является *и наличие трущихся механических деталей*, износ которых также сказывается на их работоспособности.

Перечисленные недостатки электромагнитного реле привели к созданию реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами (герконами). Их действия основано на использовании сил взаимодействия, возникающих в магнитном поле между ферромагнитными токопроводами. Эти силы вызывают деформацию и перемещение ферромагнитных токопроводящих электродов.

Простейшее герконовое реле с замыкающим контактом (рис. 12.8) состоит из двух контактных сердечников из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя), ввариваемых в стеклянный герметический баллон, заполненный инертным газом – чистым азотом или азотом с небольшой добавкой водорода ($\approx 3\%$). Давление газа внутри баллона составляет $(0,4-0,6) \cdot 10^5$ Па. Инертная среда предотвращает окисление контактных сердечников.

Баллон устанавливается в обмотке управления. При подаче тока в обмотку возникает магнитный поток Φ , который проходит по контактным сердечникам через рабочий зазор δ между ними и замыкается по воздуху вокруг обмотки.

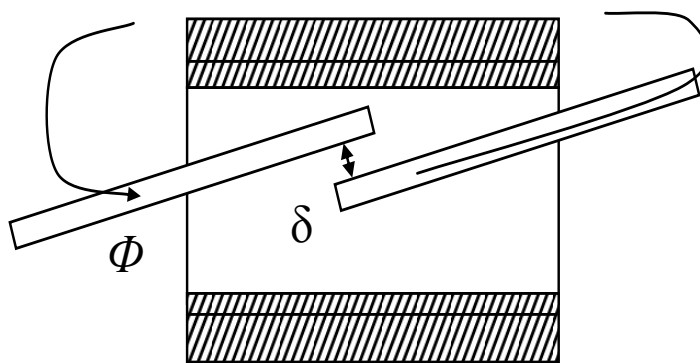


Рис. 12.8. Принцип действия герконового реле

Поток Φ при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу P_z , которая, преодолевая упругость контактных сердечников, соединяет их между собой. Для улучшения контактирования поверхности касания покрываются тонким слоем (2–50 мкм) золота, радия, палладия, рения, серебра.

При отключении обмотки магнитный поток и электромагнитная сила спадают и под действием сил упругости контакты размыкаются. Таким образом, в герконовых реле отсутствуют детали, подверженные трению, а контактные сердечники одновременно выполняют функции магнитопровода, токопровода, 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 размыкающим и переключающим контактом.

Управление герконом можно осуществлять и с помощью постоянного магнита.

Герконовые реле включают в себя намагничивающую катушку, геркон и ферромагнитные контакт-детали. Многоконтактные реле имеют одну катушку, которая охватывает несколько герконов. Число герконов в одном реле может достигать 12 и более.

Для уменьшения размеров намагничивающей катушки увеличивают допустимую плотность тока, используя для навивки теплостойкий эмалированный провод, допускающий нагрев до 180–250°C.

Все детали реле изготавливаются штамповкой и соединяются сваркой или пайкой. Для уменьшения зоны включенного состояния в герконы помещают магнитные экраны.

Пружины герконов не имеют предварительных натягов, поэтому при включении реле контакты сразу приходят в движение без периода

трогания. Этот процесс носит монотонный характер. Включение в магнитную цепь постоянного магнита превращает нейтральное герконовое реле в поляризованное.

В отличие от электромагнитного реле обычного типа, у которых контактное нажатие зависит только от параметров контактных пружин, контактное нажатие герконовых реле зависит от магнитодвижущей силы обмотки и увеличивается с ее ростом.

Из-за технических погрешностей коэффициент возврата K_v герконовых реле имеет довольно большой разброс и у одного и того же типа реле может колебаться от 0,3 до 0,9.

С целью увеличения коммутационного тока и коммутируемой мощности в конструкцию геркона вводят дополнительные дугогасительные контакты (герметические силовые контакты) – герсиконы, которые выпускаются на номинальные токи от 6,3 А до 180 А. Включаемый ток – до 180 А, отключаемый – 63 А. Частота включений – до 1200 вкл./ч можно запускать с помощью герсиконов АД мощностью до 3 кВт.

Особый класс – реле на ферритах, обладающих электромагнитной памятью. В них для переключения в катушку необходимо подать импульс тока обратной полярности, размагничивающий ферритовый сердечник (гезаконь) – герметизированные запоминающие контакты.

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство электромагнитных реле.
2. В чем отличие поляризованных реле от нейтральных?
3. Дайте определение промежуточному реле.
4. Объясните назначение, принцип действия и устройство геркона.
5. Поясните конструкцию герконовых реле.
6. Каков принцип работы реле тока на герконе?
7. Поясните работу поляризованных ГР.

ГЛАВА 13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

13.1. Назначение контакторов

Контакторы – это ЭА дистанционного действия, предназначенные для частых включений и отключений силовых электрических цепей при нормальных режимах работы. Замыкание или размыкание контактов контактора осуществляется чаще всего под воздействием электромагнитного привода. Условные графические обозначения:

1) обмотка (катушка) (ГОСТ 2.756-76);

2) контакты: а) замыкающий (ГОСТ 2.755-74); б) размыкающий.

Буквенные коды элементов контактора – первая буква кода (обязательно) – К. Двухбуквенный код – КМ (контактор, магнитный пускатель).

13.2. Классификация контакторов

В зависимости от рода привода контакторной системы различают контакторы *электромагнитные, пневматические и гидравлические*. Пневматические и гидравлические контакторы, где открытие или закрытие прохождения воздуха осуществляется электромагнитом или каким-либо другим дистанционным способом, в данном пособии не рассматриваются.

Контакторы различаются по роду тока – *постоянного, переменного* (частотой 50 и 60 Гц), а также переменного тока повышенной частоты (до 10 кГц). Контакторы могут выполняться с управлением на постоянном или переменном токе частотой 50 и 60 Гц независимо от рода тока главной цепи.

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.

По наибольшей частоте включений в час и повторно-кратковременном режиме работы контакторы делятся на классы – 0; 3; 1,3; 10; 30, что соответствует частоте 30, 120, 300, 1200, 3600 включений в час. Нормированная механическая износостойкость достигает 30 млн. циклов, коммутационная износостойкость должна быть не менее 0,1 механической.

Контакты в основном выполняются по 10 классу и на соответствующую механическую износостойкость.

13.3. Область применения контакторов

Электромагнитные контакторы получили широкое распространение, они являются основными коммутирующими аппаратами схем автоматизированного электропривода.

Изготавливаются контакторы, главным образом, на токи до 630 А, напряжением 220, 440 В постоянного тока и 380, 660 В частотой 50 и 60 Гц переменного тока, частотой включений – 600, 1200 включений в час (10 класс) и соответствующей механической износостойкостью (10–15 и 1–5 млн. циклов).

13.4. Узлы контактора и принцип его действия

Контактор имеет следующие основные узлы:

- контактную систему;
- дугогасительное устройство;
- электромагнит;
- систему вспомогательных контактов.

Главные контакты осуществляют замыкание силовой цепи.

Дугогасительная система обеспечивает гашение электрической дуги, возникающей при размыкании главных контактов.

Электромагнитная система обеспечивает дистанционное управление контактором, то есть включение и отключение.

При подаче напряжения на обмотку электромагнита контактора его якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем электромагнита, замыкает или размыкает главную цепь.

Вспомогательные контакты производят переключения в цепях управления контактора, блокировки и сигнализации. Они рассчитываются на продолжительное проведение тока не более 20 А и отключение тока не более 5 А.

На рис. 13.1 изображена конструктивная схема контактора прямоходового типа. При подаче напряжения на обмотку 5 электромагнитного привода возникает магнитный поток Φ , который развивает электромагнитную силу и притягивает к полюсам 4 верхний якорь. Вместе с ним перемещается вниз контактный элемент 2, мостиковые контакты 2 и 3 замыкают цепь тока I_0 . Контактная пружина обеспечивает необходимую силу нажатия P_k в замкнутых контактах.

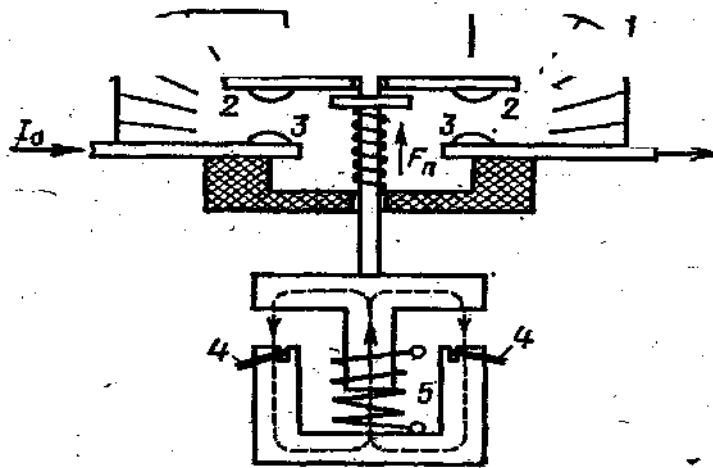


Рис.13.1. Прямоходовой контактор

Для отключения аппарата снимается напряжение с обмотки 5. Тогда исчезнет электромагнитная сила привода, и силой P_n отключающей пружины подвижная система переместится вверх, а цепь тока I_0 будет разорвана контактами 2 и 3. Возникающие при отключении тока электрические дуги между контактами 2 и 3 гасятся в дугогасительном устройстве 1.

13.5. Параметры контакторов

Основными техническими параметрами контакторов являются $I_{ном}$ главных контактов, *предельный отключаемый ток*, $U_{ном}$ коммутируемой цепи, *механическая и коммутационная износостойкость*, *допустимое число включений в час*, *собственное время включения t_v и отключения t_0* .

$I_{ном}$ контактора – это ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течение 8 ч без коммутаций и без превышения допустимой температуры различных частей контактора.

Номинальный рабочий ток контактора $I_{ном.р.}$ – это допустимый ток через его замкнутые главные контакты в конкретных условиях применения. Так, например, $I_{ном.р.}$ контактора для коммутации асинхронных двигателей с КЗ ротором выбирается из условия включения шестикратного пускового тока двигателя.

$U_{ном}$ называется наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор.

Способность контактора обеспечить работу при большем числе операций характеризуется износостойкостью. Различают механическую

и коммутационную износостойкость. Механическая износостойкость определяется числом циклов включений – отключение контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при этом равен нулю. Механическая износостойкость современных контакторов составляет $(10-20) \cdot 10^6$ операций.

Коммутационная износостойкость определяется числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость $(2-3) \cdot 10^6$ операций.

Собственное время включения (t_B) состоит из времени нарастания потока в электромагните контактора до значения потока трогания и времени движения якоря. Для контакторов постоянного тока с $I_{ном} = 100$ А, $t_B = 0,14$ с; для контакторов с $I_{ном} = 630$ А, $t_B = 0,37$ с.

Собственное время отключения контактора t_0 – время с момента обесточивания электромагнита контактора до момента размыкания его контактов. В контакторах постоянного тока с $I_{ном} = 100$ А, $t_0 = 0,07$ с, контакторах с $I_{ном} = 630$ А, $t_0 = 0,33$ с.

13.6. Контактная система

Контакторы выпускаются на номинальный ток от 10 до 1000 А при числе главных контактов от одного до пяти. Наиболее распространены контакторы трехполюсного исполнения. Контакторы имеют вспомогательные контакты, которые приводятся в действие тем же электромагнитом, что и главные контакты.

13.6.1. Электромагнитные и дугогасительные системы

Электромагнитные системы. Для уменьшения потерь от вихревых токов системы выполняются шихтованными, т.е. набираются из отдельных изолированных друг от друга пластин. Для устранения вибрации якоря система снабжена КЗ витком. Катушки низкоомные, с малым числом витков. Электромагнитная система, независимо от типа, состоит из сердечника, якоря, КЗ. витка, катушки и крепежных деталей.

Дугогасительные системы. Для контакторов с однофазным разрывом на фазу, работающих на напряжении 380 В и с частотой коммутаций до 600 включений в час применяется магнитное гашение в камерах с широкими щелями. Для контакторов тяжелого режима работы 1200 включений в час и более на напряжение 660 В широкое

распространение получило электромагнитное гашение в камерах с узкими щелями, а так же в комбинированных камерах – с узкими зигзагообразными и другими щелями в сочетании с пламегасительными решетками, где также исключается выброс дуги и ее пламени за пределы камеры.

Особо следует отметить применение для контакторов переменного тока бездуговой коммутации, что во много раз повышает износостойкость контактов.

Так, в контакторах с бездуговой коммутацией (шунтирование контактов тиристорами) в режимах коммутации, соответствующих категориям применения АС-3 и АС-4, достигается коммутационная износостойкость контактов не менее 5 млн. циклов, в то время как у контакторов с электромагнитным гашением она составляет 0,5 млн. циклов.

13.6.2. Конструкция контакторов переменного тока

Кинематические схемы современных контакторов переменного тока характеризуются большим разнообразием. Для нормальных условий работы (в основном категория АС-3) контакторы выполняются по кинематическим схемам, изображенным на рис. 13.2.

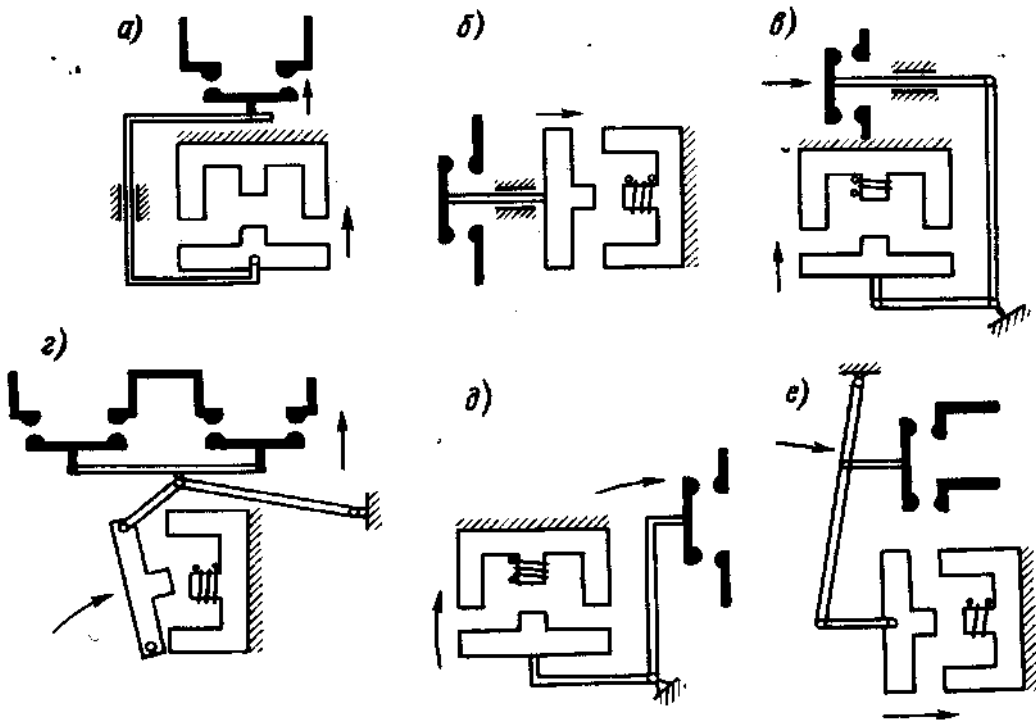


Рис. 13.2. Характерные кинематические схемы контакторов переменного тока нормального режима работы: а, б, в – прямоходовая схема; г, д, е – поворотная схема магнитной системы

Поворотные схемы применяются преимущественно в контакторах тяжелого режима работы, например, в контакторах со смешанными контактами. Вращение в подшипниках скольжения не обеспечивает высокой механической износостойкости. Для достижения износостойкости 10 млн. циклов и выше переходят на вращение вала контактора на цапфах или призматических подшипниках. Последнее также облегчает сборку контактора, так как обеспечивает самоустановку вала.

Широко применяется **прямоходовая схема** (рис.13.2 а). В ней исключаются промежуточные звенья и шарнирные соединения от якоря к контактам. Иногда контакты непосредственно связываются с якорем (рис. 13.2, б). Якорь перемещается в направляющих, где трущейся парой являются металл–пластмасса.

Отсутствие каких-либо шарнирных соединений и подшипников позволяет получить высокую механическую износостойкость. Однако за счет ударов в магнитной системе, непосредственно передаваемых контактам, здесь происходит дополнительный «вторичный» дребезг контактов, для устранения которого необходимо применять специальные меры. Здесь трудно получить наилучшее соотношение между тяговой и механической характеристиками.

Наряду с прямоходовой, весьма широкое распространение получили схемы, в которых передача движения от электромагнита к контактам осуществляется через шарнирно-рычажные соединения. Существовавшее ранее мнение, что шарнирные соединения (оси, втулки и т.п.) не обеспечивают достаточной механической износостойкости, практически опровергнуто. Высокая износостойкость (до 10 млн. циклов и выше) шарнирных соединений достигается правильным расчетом и конструкцией, отсутствием в них ударов, правильным подбором трущейся пары, например применением в качестве трущихся деталей пары металл–пластмасса и т. д.

Передача движения от электромагнита к контактам через рычажную систему позволяет подобрать желаемое соотношение плеч и достигнуть наиболее благоприятного соотношения между механической и тяговой характеристиками. Например, схема на рис. 13.2 г, представляющая собой сочетание поворотной магнитной системы с прямоходовой контактной системой, позволяет получить снижение скорости контактов в момент их замыкания и соответствующее повышение нажатия на контакты. Такая кинематика дала возможность применить многоступенчатую контактную систему при четырехкратном разрыве на полюс без существенного увеличения размеров магнитной системы. Движущиеся во взаимно перпендикулярных плоскостях прямоходовые (рис. 13.2 в)

или поворотные (рис. 13.2 д) контактные и магнитные системы приводят к снижению степени взаимного влияния ударов в каждой из систем. Кинематическая схема на рис. 13.1 е позволяет обеспечить при одинаковой по отношению к схемам на рис. 3.1 а и б магнитной системе более высокое контактное нажатие. Однако в схеме на рис. 13.1 е следует ожидать более сильных ударов, для устранения вредного влияния которых необходимо применять специальные меры.

Для тяжелых режимов работы (АС-4) контакторы выполняются с поворотными кинематическими схемами на U до 660 В частотой 50 и 60 Гц. Эти контакторы пригодны для работы на постоянном токе до 440 В. Фактически это контакторы переменного-постоянного тока. Как пример таких контакторов приведем контакторы серии КТ6600 и ее модификации.

13.6.3. Контакторы различных серий. Контакторы серии КТ6600

Контакторы серии КТ6600 выпускаются на токи до 160 А, напряжение 660 В частотой 50 и 60 Гц и 440 В постоянного тока. Частота включений – до 1200 вкл/ч, механическая износостойкость – $10 \cdot 10^6$ циклов, коммутационная износостойкость – 10^6 циклов.

Контакторы серии КТ64 и КТ65

Контакторы серии КТ64 и КТ65 выпускаются на токи до 630 А и те же напряжения и представляют собой комбинированный аппарат из контактора серии КТ 6600 и полупроводникового блока бездуговой коммутации. Механическая износостойкость – $(5...15) \cdot 10^6$ циклов, в зависимости от значения $I_{ном}$, коммутационная износостойкость (КИ) – $5 \cdot 10^6$ циклов, а при коммутации $I_{ном}$ – $15 \cdot 10^6$ циклов.

Конструкция контакторов – моноблочная с поворотной подвижной системой.

Контакторы серии МК

Контакторы серии МК могут работать в цепях постоянного тока U до 440 В и в цепях переменного тока U до 660 В, частотой 50, 60 Гц при I_n до 160 А. Электромагнитный привод контактора выполняется только на постоянном токе с U_{24} –220 В. Для гашения дуги постоянного тока имеются две системы магнитного гашения с катушкой тока. Контакторы, в зависимости от модификации, могут иметь от одной до трех систем

главных контакторов. Таким образом, контактор может работать в трехфазных цепях и при этом использоваться для пуска трехфазных асинхронных двигателей. Контактор имеет также четыре цепи вспомогательных замыкающих и размыкающих контактов. МИ контакторов с I_H до 63А $16 \cdot 10^6$, с I_H 100 А и 160 А – $10 \cdot 10^6$ циклов. Допустимая частота срабатывания – 1200 вкл./ч при ПВ = 40%.

Для увеличения износостойкости и надежности контакторов серии МК используется полупроводниковая приставка. Контакторы МК с приставкой предназначены для тяжелого режима работы АС-4 с частотой коммутации 1200 вкл./ч и более. Их КИ составляет $5 \cdot 10^6$ циклов при $I_H = 63$ А и $3 \cdot 10^6$ циклов при $I_H = 100$ А.

13.6.4. Контакторы переменного тока на напряжение 1140 В

Электрическая схема контактора с бездуговой коммутацией приведена на рис. 13.3. Контактор имеет три основных контакта 1, 2, 3 и соответствующие дугогасительные контакты 1.1 и 1.2, 2.1, 3.1 и 3.2 с синхронизирующими катушками и диодами, обеспечивающими бездуговое отключение. Замыкание основных и дугогасительных контактов при включении контактора и удержании их в замкнутом состоянии осуществляется общим электромагнитным приводом с втягивающей катушкой 4. Основные подвижные контакты, как и в обычных контакторах, жестко связаны с приводом.

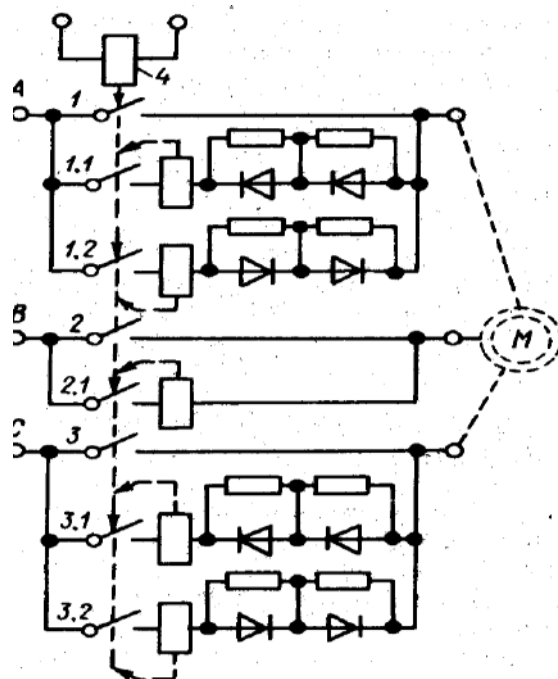


Рис. 13.3. Принципиальная электрическая схема контактора с синхронизированным отключением

Конструкция одного из полюсов (В) здесь упрощена – основной контакт в нем шунтирован только одним дугогасительным контактом с синхронизирующим электромагнитом, диоды отсутствуют. По коммутационной способности контактор удовлетворяет требованиям ГОСТ 11206-77Е по категориям применения АС-3 и АС-4 при частоте включений до 1200 вкл/ч.

13.6.5. Контакторы переменного тока вакуумные

Вакуумные контакторы имеют герметичное ДУ, с помощью которого отключение коммутируемой цепи происходит в вакуумной среде за один-два полупериода. Разработаны на токи до 630 А, напряжение до 1140 В частотой 50 и 60 Гц, на частоту включений до 1200 вкл/ч. Контакторы вакуумные обеспечивают высокую коммутационную способность. Например, у контактора на I_n 400А при $U = 660 - 1140$ В соответственно ток включения – 8800 – 6500 А_ф, ток отключения – 4800 – 3450 А, ток динамической стойкости 10000 А, термическая стойкость – 8000 А²с. На такой основе созданы трехфазные контакторы типов КТ12Р33 и КТ12Р37 с I_n 160 А и 400 А и U_n 660 и 1140 В. Контакторы предназначены для работы в режимах АС-3 и АС-4 при числе циклов 600 и 1200 в час с высокой износостойкостью.

13.6.6. Выбор, применение и эксплуатация контакторов

1. Важнейшей характеристикой контакторов (K) является режим коммутаций нагрузки. Характеристики режимов коммутации K следует использовать при их выборе.

2. Для K серии КПВ допустимый ток повторно-кратковременного режима $I_{\text{доп}}$ учетом нагрева контактов можно определить по формуле

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{ном}}}{\sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100} - \frac{n}{600} \sqrt{\frac{\text{ПВ}\%}{100}}}}, \quad (13.1)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток контактора для длительного режима работы; ПВ – продолжительность включения, %; n – число включений в час.

В ряде случаев заводом-изготовителем указываются допустимые коммутируемые токи K при различных режимах работы и различном напряжении коммутируемой цепи.

3. Колебания напряжения на катушке K в эксплуатации должны находиться в пределах, гарантируемых заводом-изготовителем (обычно +10 и -15 % номинального значения).

При заказе контактора необходимо указать его тип, напряжение и ток цепи главных контакторов (частоту, если ток переменный), число и исполнение вспомогательных контактов (замыкающих и размыкающих), напряжение катушки, климатическое исполнение и категорию размещения. Ток, 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 контакторы), один замыкающий контакт; вспомогательные контакты: два замыкающих и два размыкающих; катушка 24 В. Исполнение УЗ.

Контрольные вопросы

1. Перечислите назначение контакторов.
2. Перечислите классификацию контакторов.
3. Назовите область применения контакторов.
4. Перечислите основные узлы контакторов.
5. Назовите основные технические параметры контакторов.
6. Поясните конструкцию контакторов переменного тока.

ГЛАВА 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

14.1. Режимы работы контакторов; физические явления, происходящие в электрических аппаратах

Коммутационная способность контакторов определяется и регламентируется условиями работы. В настоящее время частота коммутации в схемах электропривода достигает 3600 в час. Этот режим работы является наиболее тяжелым. Основными операциями управления электроприводами является пуск, реверсирование, торможение, отключение. На переменном токе это означает:

1) включение при $I_{\text{ном}}$ и $\cos \varphi = 0,3 \dots 0,4$ шестикратных и реже – десяти-двенадцатикратных $I_{\text{ном}}$ при пуске и реверсе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;

2) отключение $I_{\text{ном}}$ при U до $0,2U_{\text{ном}}$ двигателей, вращающихся с полной (или близкой к ней) частотой вращения, или 6- 10-кратных токов при $(1 \dots 1,1) U_{\text{ном}}$ и $\cos \varphi = 0,3 \dots 0,4$, если двигатель не тронулся или только тронулся ($n < 0,2 n_{\text{ном}}$). В этих режимах износ контакторов при замыкании может превосходить износ при размыкании.

Аналогичная картина имеет место при управлении двигателями постоянного тока, однако пусковые и отключаемые токи не разогнавшихся двигателей здесь находятся в пределах $2,5-4 I_{\text{ном}}$, а восстанавливающееся на контактах напряжение при отключении двигателя составляет $0,1 U_{\text{ном}}$.

ГОСТ 11206-77 нормирует коммутационную способность контакторов общего назначения переменного тока по четырем категориям применения АС-1–АС-4, а контакторов постоянного тока – по пяти категориям применения ДС-1–ДС-5.

Для контакторов существует еще один режим – редких коммутаций, характеризуемый более тяжелыми условиями, чем при нормальных коммутациях (ток включения достигает $10 I_{\text{ном}}$). Такие режимы возникают довольно редко (например, при КЗ).

14.2. Контакторы постоянного тока, их конструкция и основные параметры

Контакторы постоянного тока выпускаются в основном на $U_{\text{ном}}$ 220 и 440 В, токи 630 А, одно и двухполюсные, а также многополюсные со смешанными (замыкающими и размыкающими) контактами.

Основные направления развития контакторов – повышение коммутационной способности, механической и коммутационной износостойкости.

Контактные системы контакторов – одноступенчатые, рычажные. Дугогасительные системы построены на принципе гашения электрической дуги поперечным магнитным полем в камерах с продольными щелями. Магнитное поле гашения в подавляющем большинстве конструкций возбуждается последовательной дугогасительной катушкой.

14.3. Контакторы серии КПВ-600

Имеются два исполнения контактной системы – с замыкающими и размыкающими 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.

Характеристика противодействующих усилий, приведенных к якорию электромагнита для контактора КПВ-600 приведена на рис. 14.1, 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.

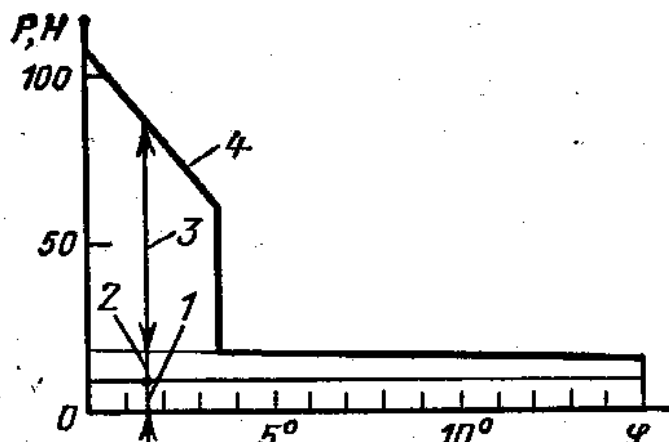


Рис. 14.1. Характеристика противодействующих усилий контактора КПВ-600

Важным параметром контактора является коэффициент возврата $k_B = U_{отп}/U_{ср}$. Для контакторов постоянного тока k_B , 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.

14.4. Контакторы типа КТПВ-600

Применяются для реверса асинхронных двигателей при большой частоте включений в час (до 1200). В этих контакторах сведенные полюса, подвижные контакты изолированы от корпуса, что делает более безопасным обслуживание аппарата. 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.

Контакторы с двухполюсной контактной системой очень удобны для закорачивания сопротивлений в цепи ротора двигателей.

В контакторах при $I_H = 600A$ устанавливаются два параллельно работающих электромагнита для того, чтобы развить необходимую силу.

14.5. Контакторы типа КМВ. Контакторы серии КП81

Контакторы типа КМВ. Предназначены для включения и отключения мощных электромагнитов постоянного тока масляных выключателей. Применяется двухполюсная контактная система. Такая система включенная в оба провода сети постоянного тока, обеспечивает надежное отключение индуктивной нагрузки, так как в отключенную цепь вводятся два дуговых промежутка.

Контакторы серии КП81. Рассчитаны на токи до 630 А и напряжение 220 В. Применено бездуговое гашение с использованием тиристорov и силовых диодов. Контакторы построены на базе серийных контакторов КТП 6000 с полупроводниковыми блоками БПК51. При этом допускается отдельное от контактора расположение блока на расстоянии до 1,5 м. Контакторы обеспечивают бездуговую коммутацию токов нагрузки до $2,5 I_{ном}$ при постоянной времени до 10 мс, а в режиме редких коммутаций – до $10 I_{ном}$.

Коммутационная износостойкость контакторов в режиме нормальных коммутаций при частоте включений до 2000 вкл/ч составляет 5 млн. циклов (ранее при «дуговой» коммутации – 0,5–1 млн. циклов).

14.6. Выбор электрических аппаратов

Выбор контакторов постоянного тока осуществляется по тем же правилам, что и контакторов переменного тока.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется и регламентируется коммутационная способность контакторов?
2. Сколько режимов редких коммутаций для контакторов существует?
3. Какие контакторы постоянного тока существуют?
4. Перечислите основные направления развития контакторов.
5. Перечислите исполнения контактной системы.
6. Перечислите предназначение контакторов типа КМВ.

Принятые сокращения по нормам и правилам работы

НТД – нормативно-техническая документация
ПЭЭП – Правила эксплуатации электроустановок потребителей
ПТЭЭП – Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей
ПУЭ – Правила устройства электроустановок
ИПИСЗ – Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках
ППБ – Правила пожарной безопасности
СНиП – Строительные нормы и правила
СТ МЭК – Стандарт Международной электротехнической комиссии
ССБТ – Система стандартов безопасности труда

Организации, службы и категория работников

ФСТ – Федеральная служба по тарифам
РАО – Российское акционерное общество
ЕЭС – Единая энергетическая система
БТИ – Бюро технической инвентаризации
РРС – районная распределительная сеть
ДЕЗ – дирекция единого заказчика
СМО – строительно-монтажная организация
КИПиА – контрольно-измерительные приборы и автоматика
ИТР – инженерно-технические работники
ППР – планово-предупредительный ремонт

Электроустановки и вид энергии (мощности)

ЭУ – электроустановка
РМ – реактивная мощность
ХХ – холостой ход
ИБП – источник бесперебойного питания
УЗО – устройство защитного отключения
АСУ(Э) – автоматизированная система управления (энергохозяйством)
АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электропотребления
РЗА – релейная защита и автоматика
КУ – конденсаторная установка
СК – синхронный компенсатор
СЭТ – счетчик электронный тарифный
ТТ – трансформатор тока

ТН – трансформатор напряжения

Г – генераторные зажимы (счетчика)

СЗ – средства защиты

ТП – трансформаторная подстанция

РП – распределительный пункт

ЦП – центр питания

ВРЩ – водно-распределительный щит

РУ – распределительное устройство

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов М.В. Технология производства электрических машин: учебное пособие для вузов / М.В. Антонов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. ГОСТ 17703-72 «Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия» от 01.06.2005
3. Копылов И.П. Электрические машины: учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2006.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, СО 153-34.20.501-2003, ОРГРЭС.
5. Электротехника СССР: Отраслевой каталог. Информэлектро, 1986.
6. Электрические аппараты: учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Л.А. Родштейн – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
7. ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия».
8. Электрические аппараты / Л.А. Родштейн. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. – 303 с.
9. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. – Москва: Высшая школа, 1988. – 301 с.
10. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970.
11. ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия».
12. Электрические аппараты / Л.А. Родштейн. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. – 303 с.
13. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. – Москва: Высшая школа, 1988. – 301 с.
14. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970.

Учебное издание

**Сидоров Александр Евгеньевич,
Маркин Олег Юрьевич,
Доломанюк Леонид Владимирович,
Максимов Виктор Владимирович,
Цветков Алексей Николаевич**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

для студентов, обучающихся по направлению
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра электроснабжения промышленных предприятий КГЭУ

Редактор издательского отдела *Ж.В. Фёдорова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 28.12.16.

Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,58. Тираж 500 экз. Заказ № 99/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51