

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева
Кафедра «Электроэнергетика»

Косырихин В.С.
доцент, канд. техн. наук

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

учебной дисциплины (модуля)

«Средства коммутации электрической энергии»

Уровень профессионального образования:
высшее образование – бакалавриат

Направление (специальность) подготовки:
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль (специализация) подготовки:
«Электроснабжение»

Квалификация выпускника: бакалавр
Форма обучения: (очная, заочная)

Тула 2016 г.

Рассмотрено на заседании кафедры
протокол № 07 от "21" июня 2016 г.
Зав. кафедрой _____ В.М. Степанов

Содержание

6 семестр	7
1.1 Предмет и задачи изучения дисциплины, её значение для подготовки дипломированных специалистов	7
1.2.1 Совершенствование электрических аппаратов как насущная необходимость повышения эффективности установок по производству, распределению и потреблению электрической энергии	7
1.3 Электрические и электронные аппараты как средства управления режимами работы, защиты и регулирования параметров системы электроснабжения и управления автоматизированным электроприводом; электромеханические аппараты автоматики, управления, распределительных устройств (РУ) и релейной защиты	8
1.3.1 Назначение и область применения электрических аппаратов (ЭА)	8
1.3.2 Классификация электрических аппаратов	9
1.4 Расположение электрических аппаратов в установке по производству по производству, распределению и потреблению электрической энергии	10
1.5. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам	10
1.6 Особенности схем электроустановок и общие требования к их выполнению	11
2.1 Свойства дугового разряда	13
2.2 Вольт-амперная характеристика дуги (ВАХ)	13
2.3 Условия гашения дуги постоянного тока	15
2.4 Энергия, выделяемая в дуге	16
2.5. Условия гашения дуги переменного тока	18
3.1 Способы гашения электрической дуги	20
3.2 Дугогасительные устройства постоянного и переменного тока	20
3.2.1 Широкие и узкие продольные щели	20
3.2.2 Дугогасительные решётки	21
3.2.4 Гашение дуги в масле	23
3.2.5. Гашение дуги воздушным дутьём	23
3.2.6 Гашение дуги в элегазе	24
3.2.7 Гашение дуги в вакууме	25
3.3 Применение полупроводниковых приборов для облегчения гашения дуги	26
3.3.1 Коммутация цепей переменного тока	26
3.3.2 Коммутация цепей постоянного тока	28
4.1 Общие сведения	29
4.2 Режимы работы контактов	30
4.2.1 Включение цепи	30
4.2.2 Проведение тока во включенном состоянии	32
4.2.3 Отключение цепи	33
4.2.4 Способы уменьшения износа контактов	33
4.3 Материалы контактов	34
4.4 Конструкция твёрдометаллических контактов	35
4.5 Жидкометаллические контакты	35
4.6 Расчёт контактов аппаратов	36
5.1 Общие сведения	38
5.3 Усилия между параллельными проводниками	40
5.4 Усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники	41
5.5 Усилия в витке, катушке и между катушками	42
6 УСИЛИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ	43
6.1 Усилия в месте изменения сечения проводника	43
6.2 Усилия при наличии ферромагнитных частей	43
6.3 Электродинамические усилия при переменном токе	43
6.4 Электродинамическая стойкость электрических аппаратов	44

7.1 Общие сведения	46
7.2 Активные потери энергии в аппаратах	46
7.3 Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности	47
7.5 Нагрев аппаратов в переходных режимах	48
7.6 Нагрев аппаратов при коротком замыкании	50
7.7 Допустимая температура различных частей электрических аппаратов	51
7.8 Термическая стойкость электрических аппаратов	51
8.1 Назначение контакторов	52
8.2 Классификация контакторов	52
8.3 Область применения контакторов	52
8.4 Узлы контактора и принцип его действия; физические явления, происходящие в электрическом аппарате	52
8.5 Параметры контакторов	53
9.1 Контактная система	55
9.2 Электромагнитные системы: физические явления, происходящие в электрических аппаратах	55
9.3 Конструкция контакторов переменного тока	55
9.4 Контакторы серии КТ6600	57
9.5 Контакторы серии КТ64 и КТ65	57
9.6 Контакторы серии МК	57
9.7 Контакторы переменного тока на напряжение 1140 В	57
9.8 Контакторы переменного тока вакуумные	58
9.9 Выбор, применение и эксплуатация контакторов	58
10.1 Режимы работы контакторов, физические явления, происходящие в электрических аппаратах	60
10.2 Контакторы постоянного тока, их конструкция и основные параметры	60
10.3 Контакторы серии КПВ-600	60
10.4 Контакторы типа КТПВ-600	61
10.5 Контакторы типа КМВ. Контакторы серии КП81	61
10.6 Выбор электрических аппаратов	62
11.1 Назначение магнитных пускателей	63
11.2 Основные требования и условия работы; физические явления, происходящие в электрических аппаратах	63
11.3 Конструкция и схема включения	63
11.4 Магнитные пускатели серии ПМЛ	65
11.5 Пускатели серии ПМА	65
11.6 Нереверсивные пускатели	65
11.7 Схема включения нереверсивного пускателя	66
11.8 Реверсивный магнитный пускатель	66
11.9 Схема включения реверсивного пускателя	66
11.10 Выбор магнитных пускателей	67
12.1 Назначение и область применения реле	69
12.2 Классификация реле	69
12.3 Принцип действия и устройство электромагнитных реле, физические явления в электрических аппаратах	69
12.4 Основные характеристики и параметры реле	71
12.5 Требования, предъявляемые к реле	72
12.6 Согласование тяговых и противодействующих характеристик реле	72
12.7 Электромагнитные реле тока и напряжения для защиты энергосистем, управления и защиты электропривода	74
12.8 Выбор, применение и эксплуатация максимально-токовых реле	74
7 семестр	77
13.1 Назначение, принцип действия и устройство геркона; физические явления в электрическом аппарате	77

13.2 Основные параметры герконового реле	79
13.3 Конструкции герконовых реле	81
13.4 Реле тока на герконе	82
13.5 Поляризованные ГР	82
13.6 Управление герконом с помощью ферромагнитного экрана	82
14.1 ГР с магнитной памятью	84
14.2 Конструкция гезаконов	85
14.3. Силовые герконы	85
14.4 Расчёт обмотки геркона	86
15.1 Основные понятия, физические явления в электрических аппаратах	88
15.2 Энергия магнитного поля и индуктивность системы	88
15.3 Работа, производимая якорем магнита при перемещении	90
15.4 Вычисление сил и моментов электромагнита	91
15.5 Электромагниты переменного тока	93
15.6 Короткозамкнутый виток	93
15.7 Статические тяговые характеристики электромагнитов и механические характеристики аппаратов	95
16.1 Динамические характеристики электромагнитов	98
16.2 Уравнение движения подвижной системы	99
16.3 Замедление и ускорение действия электромагнита	100
16.4 Тормозные устройства, физические явления в электрических аппаратах	102
16.5 Поляризованные электромагнитные системы	103
17.1 Назначение, принцип действия и устройство предохранителя	106
17.2 Параметры предохранителя	107
17.3 Конструкция предохранителей	110
17.4 Предохранители с гашением дуги в закрытом объёме	110
17.6 Предохранители с жидкометаллическим контактом	111
17.7 Быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов	112
17.8 Предохранитель-выключатель	112
17.9 Выбор, применение и эксплуатация предохранителя для защиты электродвигателя и полупроводниковых устройств	112
18.1 Назначение, классификация и область применения автоматов	115
18.2 Требования, предъявляемые к автоматам	117
18.3 Узлы автомата и принцип его действия, физические явления в электрическом аппарате	117
18.4 Основные параметры автомата	118
18.5 Универсальные и установочные автоматы	119
18.6 Быстродействующие автоматы	119
18.7 Автоматы для гашения магнитного поля мощных генераторов	120
18.8 Выбор, применение и эксплуатация автоматических воздушных выключателей	120
19.1 Назначение выключателей ВН	122
19.2 Основные параметры	122
19.3 Требования, предъявляемые к выключателям	123
19.4 Классификация выключателей	123
19.5 Принцип действия и устройство высоковольтных выключателей, физические явления в электрическом аппарате	123
19.7 Маломасляные выключатели	126
20.1 Приводы масляных выключателей	128
20.2 Воздушные выключатели	128
20.3 Элегазовые выключатели	129
20.4 Вакуумные выключатели	130
20.5 Электромагнитные выключатели	131
20.6 Выключатели нагрузки	131
20.7 Выбор, применение и эксплуатация выключателей ВН	132

21.1 Назначение разъединителей	134
21.2 Требования, предъявляемые к разъединителям	134
21.3 Классификация разъединителей	135
21.4 Принцип действия, устройство и основные параметры разъединителей, физические явления в электрических аппаратах.....	135
21.5 Разъединители для внутренней установки.....	136
21.6 Разъединители для наружной установки	136
21.7 Блокировка разъединителей и выключателей	138
22.1 Назначение и принцип действия короткозамыкателей и отделителей, физические явления в электрических аппаратах.....	140
22.2 Конструкция короткозамыкателей и отделителей	141
22.3 Основные параметры	143
22.4 Выбор короткозамыкателей и отделителей	143
23.1 Назначение, область применения и принцип работы реактора, физические явления в электрическом аппарате.....	144
23.2 Основные параметры реактора	145
23.3 Бетонные реакторы.....	145
23.4 Масляные реакторы.....	146
23.5 Сдвоенные реакторы	146
23.6 Выбор, применение и эксплуатация реакторов	147
24.1 Назначение, область применения разрядников	149
24.2 Требования, предъявляемые к разрядникам	149
24.3 Основные параметры разрядников	149
24.4 Конструкции разрядников, физические явления в электрических аппаратах.....	150
24.5 Трубчатые разрядники, физические явления в электрическом аппарате	150
24.6 Вентильные разрядники, физические явления в электрическом аппарате.....	150
24.7 Разрядники постоянного тока, физические явления в электрическом аппарате.....	151
24.8 Ограничители перенапряжения, физические явления в электрических аппаратах	152
24.9 Выбор разрядников	152
25.1 Назначение предохранителей.....	153
25.2 Требования, предъявляемые к предохранителям ВН	153
25.3 Принцип действия, устройство и основные параметры предохранителей ВН, физические явления в электрических аппаратах.....	153
25.4 Предохранители с мелкозернистым наполнителем серий ПК и ПКТ.....	153
25.5 Предохранители серии ПКТН.....	154
25.6 Предохранители с автогазовым, газовым и жидкостным гашением дуги.....	155
25.7 Выбор, применение и эксплуатация предохранителей ВН	155
Список литературы	157
Основная литература	157
2 Дополнительная литература	157

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ

1.1 Предмет и задачи изучения дисциплины, её значение для подготовки дипломированных специалистов

Дисциплина "Электрические и электронные аппараты" (ЭиЭА) относится к базовым дисциплинам направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» специализации "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов". Целью преподавания дисциплины являются освоение теоретических основ электрических и электронных аппаратов, ознакомление с назначением, устройством и их техническими характеристиками. Задачей изучения дисциплины является получение знаний, позволяющих правильно выбирать электрические и электронные аппараты в зависимости от технических и экономических требований, предъявляемых к ним.

Данная дисциплина базируется на фундаментальных и общетехнических дисциплинах и общетехнических дисциплинах учебного плана специальности: физике, высшей математике, теоретической механике, теоретических основах электроники, электрических машинах и др.

Она будет использоваться при изучении дисциплин специализации, дипломном и курсовом проектировании.

1.2 Понятие об электрическом и электронном аппарате

Широкая программа развития средств электрификации и автоматизации делает непрерывным прогресс в области отечественного электроаппаратостроения. ЭиЭА являются одним из основных средств автоматизации и электрификации народного хозяйства и развиваются очень интенсивно.

Аппарат (от латинского apparatus - оборудование) - это прибор техническое устройство, приспособление.

1.2.1 Совершенствование электрических аппаратов как насущная необходимость повышения эффективности установок по производству, распределению и потреблению электрической энергии

ЭА осуществляют поток энергии от источника к приемнику. Они применяются в системах производства и распределения электроэнергии и электроснабжения во всех областях народного хозяйства, в схемах автоматического и неавтоматического управления электрическими машинами и разным оборудованием.

Наряду с электрическими машинами ЭА являются основными средствами электрификации и автоматизации. Стоимость их нередко оказывается соизмеримой со стоимостью управляемых ими электрических машин и оборудования или даже превышает ее. ЭА составляют самостоятельную и обширную область электротехники, к которой относится большинство средств автоматизации.

Научно-технический прогресс непосредственно связан с электровооруженностью производства, так как производительность труда пропорциональна его электровооруженности. Простой рост качества выпускаемых аппаратов не обеспечивает темпы электрификации страны. Необходимо непрерывное их совершенствование на основе развития общей теории электроаппаратостроения, углубление представления о физике явлений, протекающих в ЭА, при их проектировании. При снижении материалоемкости и трудозатрат на их изготовление требуется повышения уровней их напряжения и токов, быстродействия надежности и ресурса.

На базе новых технологий и материалов должны быть расширены работы по созданию бесконтактных (статических) аппаратов, аппаратов с жидкометаллическими контактами, по миниатюризации конструкций и модульному их исполнению.

1.3 Электрические и электронные аппараты как средства управления режимами работы, защиты и регулирования параметров системы электроснабжения и управления автоматизированным электроприводом; электромеханические аппараты автоматики, управления, распределительных устройств (РУ) и релейной защиты

1.3.1 Назначение и область применения электрических аппаратов (ЭА)

ЭА-электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для производства (электростанции), передачи, распределения (электрические сети и подстанции) и потребления (электрический привод) электроэнергии.

ЭА представляют собой средства управления электрическим током, которые заключаются в управлении параметрами, характеризующими ток: электрическим напряжением, электрической мощностью и энергией, частотой электрического тока, его силой, формой импульсного тока (напряжения), магнитным потоком и т.д.

В техническом отношении к функциям управления током относятся:

- 1) коммутация (включение - отключение) электрического тока и связанных с ним параметров;
- 2) автоматическое и неавтоматическое регулирование, стабилизация, изменение по заданному закону электрического тока и связанным с ним параметров;
- 3) распределение тока (электроэнергии) по объектам и потребителям;
- 4) защита электрического оборудования от аварийных режимов (короткого замыкания, перегрузки, изменения частоты тока, направления потоков энергии и др.);
- 5) контроль параметров электрического тока для подачи информации на входные органы автоматических регуляторов или аппаратов защиты;
- 6) преобразование параметров тока (его вида, формы кривой, частоты и др.) для создания быстродействующих, высокочувствительных, высокоэффективных, и надежных ЭА и систем управления.

ЭА являются основными средствами автоматизации и электрификации народного хозяйства. Они нашли широкое применение в энергетике (электрические станции и сети), в различных схемах управления оборудованием, светотехнике, плазменной технике и др., а также в системах автоматики, телемеханики, электросвязи радиотехнике в автоматизированных системах управления. Условия работы ЭА в различных областях техники имеют существенные отличия в технических параметрах и характеристиках, а также в конструктивном исполнении.

Понятие "ЭА" охватывает очень обширный класс всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

Для выполнения переключения в целях управления ЭА переменного и постоянного тока предназначены аппараты управления (АУ). Из большого разнообразия АУ можно выделить следующие основные группы: контроллеры, командоаппараты и реостаты, контакторы и магнитные пускатели, электромагнитные и тепловые реле, датчики неэлектрических величин.

Аппаратура РУ НН и ВН служит для управления, измерения, защиты и регулирования при генерировании, передачи, распределении и преобразовании электроэнергии. К ним относятся рубильники и переключатели, предохранители, автоматические воздушные выключатели (автоматы), выключатели переменного тока, разъединители, отделители и короткозамыкатели, реакторы разрядники, трансформаторы тока и напряжения, комплектные РУ ВН.

1.3.2 Классификация электрических аппаратов

Для коммутационных аппаратов общим стандартом является ГОСТ 17703-72 "Аппараты электрические коммутационные. Основные понятия".

Для других групп аппаратов обобщающих стандартов нет, имеются частные стандарты, а также отраслевой каталог ("Электротехника СССР: Отраслевой каталог. Информэлектро 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 шесть групп.

1. Коммутационные аппараты распределительных устройств, служащие включения и отключения электрических цепей. Согласно ГОСТ 17703-72 к ним относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатель нагрузки. Выключатели ВН, разъединители, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели, предохранители. Для аппаратов этой группы характера 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, число которых 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 выходной величины может быть как плавным (измерительные датчики), так и скачкообразным (реле-датчики). С помощью датчиков могут контролироваться как электрические так и неэлектрические величины.

5. Аппараты для измерений. С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает 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. 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 РУ НН и ВН. 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:

- 1) *по номинальному напряжению* на две группы: аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением свыше 1000 В);
- 2) *по роду тока* - постоянного тока: переменного тока промышленной частоты, переменного тока повышенной частоты;
- 3) *по роду защиты от окружающей среды* - в исполнении открытом, защищенном,

брызгозащищенном, воздухозащищенном, герметичном, взрывобезопасном и т.д.:

- 4) *по способу действия* - электромагнитные, магнитоэлектрические, индуктивные, тепловые и т. д.;
- 5) *по ряду других факторов* (быстродействие, способы гашения дуги и т. п.).

1.4 Расположение электрических аппаратов в установке по производству по производству, распределению и потреблению электрической энергии

ЭА условно можно разделить на пять основных видов.

1. Аппараты высокого напряжения, управляющие режимом работы электрических сетей и систем ВН (6, 10, 20, 35, 110, 220, 330, 550, 750, 1150 кВ). С их помощью выполняются оперативные переключения в сетях и системам, а также осуществляется защита от токов КЗ, от перенапряжения, от перегрузки др.

2. Аппараты управления, управляющие режимом работы электрооборудования и распределительных сетей на номинальное напряжения 127, 220, 380, 500, 660, 1140 В, а также осуществляют автоматизированную защиту от аварийного режимов.

3. ЭА автоматики, выполняющих функцию контроля электрических и неэлектрических параметров, работающего оборудования и вырабатывающие сигналы в схемы автоматики и управления, которые соответствуют контролируемым параметрам, а также включающий в себя реле автоматики и защиты.

4. Автоматические регуляторы и стабилизаторы, предназначены для автоматического регулирования по заданному закону тока или иного параметра или поддержания этого параметра на заданном уровне.

5. Усилители и преобразователи, осуществляющие усиления слабых сигналов, подаваемых на входе (усилители), а также преобразование одной формы сигнала в другую (преобразователи) например сигналы постоянного тока в переменный и наоборот.

1.5. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам

Требования, предъявляемые к ЭА чрезвычайно разнообразны и зависят от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата, необходимой надежности. Кроме специфических требований, относящихся к данному аппарату, все ЭА должны удовлетворять нескольким общим требованиям:

1. Каждый ЭА при работе обтекается каким-либо рабочим током, при этом в токоведущих частях выделяется определенное количество теплоты и аппарат нагревается. При номинальном режиме работы температура токоведущих частей аппарат не должна превышать некоторого определенного значения, установленного для данного аппарата и его деталей соответствующим ГОСТ или другим нормативным документам.

2. В каждой цепи может быть ненормальный (перегрузка) или аварийный(короткое замыкание) режим работы. Ток, протекающий по аппарату в это время, весьма заметно (в 50 и более раз) превышает номинальный или рабочий ток.

При коротком замыкании (КЗ) токоведущие части аппарата подвергаются чрезвычайно большим термическим и электродинамическим нагрузкам, вызываемым значительным током. Эти нагрузки ЭА должен выдержать без каких-либо деформаций и остаточных явлений, нарушающих работоспособность аппарата после устранения КЗ.

3. Каждый ЭА работает в цепи с определенным напряжением, где возможно и перенапряжение. Изоляция ЭА должна обеспечивать надежную работу его при заданных значениях перенапряжения, которые имеют место в эксплуатации, и обладать определенным запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции с течением времени и вследствие осаждения влаги, пыли, грязи.

4. Контакты аппарата должны быть способны включать и отключать все токи рабочих режимов, а многие аппараты также токи аварийных режимов, которые могут возникать в управляемых и защищаемых цепях. Контакты аппаратов, предназначенных для отключения тока КЗ, должны быть рассчитаны на этот режим.

5. К каждому ЭА предъявляются требования по быстродействию, надежности и точности работы. При этом все функции аппарат должен выполнять в условиях, соответствующих внешним воздействиям.

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

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

8. Масса, габаритные размеры, стоимость и время, необходимое для установки и обслуживания ЭА должны быть минимальными. Отвечающие современным требованиям ЭА за срок службы 25 лет не должны нуждаться в ремонте и сложной ревизии. Конструкция ЭА должна быть удобна в обслуживании и технологичной в производстве. Обеспечивать возможность применения автоматизации в процессе их сборки и эксплуатации.

1.6 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 устройств служат электрические схемы, на которых показывают 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 (дистанционное управления, телемеханики, релейной защиты и автоматики), содержащие десятки цепей и соответствующее множество элементов. ЭА различного назначения. В простых схемах, зная смысл условных графических обозначений отдельных элементов и связей между ними, разобраться нетрудно. Для чтения сложных схем этого 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. Это обусловлено например в электроустановках электрических устройств с кинематическими или гидропневматическими связями элементов.

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 находящихся 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.

Общие требования к электрическим схемам установлены стандартом ЕСКД, в которых даны определения различных видов и типов схем, приведены правила их выполнения, условные графические, буквенно-цифровые обозначения электрических устройств и их элементов, а также обозначение электрических цепей.

Основными из них являются:

- 1) разрядники, предохранители (ГОСТ 2727-68);
- 2) резисторы, конденсаторы (ГОСТ 2.728-74);
- 3) полупроводниковые приборы (ГОСТ 2.730-73);

- 4) коммутационные устройства и контактные соединения (по ГОСТ 2.755-74);
- 5) воспринимающая часть электромеханических устройств (ГОСТ 2.756-76);
- 6) обозначения условные графические для электрических схем (ГОСТ 2.748-68);
- 7) обозначения буквенно-цифровые в принципиальных схемах (ГОСТ 2.710-81, СТ СЭВ 2182-80).

2 СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И УСЛОВИЯ ЕЁ ГАШЕНИЯ

2.1 Свойства дугового разряда

В коммутационных ЭА, предназначенных для замыкания и размыкания цепи с током, при отключении возникает разряд в газе либо в виде тлеющего разряда, либо в виде дуги. Тлеющий разряд возникает тогда, когда отключаемый ток ниже 0,1 А, а напряжение на контактах достигает величины 250-300 В. Такой разряд встречается либо на контактах маломощных реле, либо как переходная фаза к разряду в виде электрической дуги.

Если ток в цепи напряжения выше значений $I_0 = 0,03-0,9$ А, то имеет место дуговой разряд. Основные свойства дугового разряда:

- 1) Дуговой разряд имеет место только при токах большой величины. Минимальный ток дуги для различных материалов $I_0 = 0,9A$ и для металлов составляет 0,5А.
- 2) Температура центральной части дуги очень велика и в аппаратах может достигать 6000-25000 К.
- 3) Падение напряжения у катода составляет всего 10-20 В и практически не зависит от тока.

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околочатодную, область столба дуги и околочатодную.

2.2 Вольт-амперная характеристика дуги (ВАХ)

Важнейшей характеристикой дуги является зависимость напряжения на ней от величины тока. Эта характеристика называется вольтамперной. Имеет место статическая вольтамперная характеристика и динамическая вольтамперная характеристика.

С ростом тока i увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги r_0 . Напряжение на дуге равно $i r_0$.

Зависимость напряжения на дуге от тока при медленном его изменении называется статической вольтамперной характеристикой дуги.

Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов и параметров среды, в которой горит дуга:

а) статическая вольтамперная характеристика

$$U_0 = U_{\Sigma} + E \cdot l,$$

где U_0 - напряжение на дуге; U_{Σ} - сумма околэлектродного падений напряжений; E - напряженность поля в столбе дуги; l - длина дуги.

Величина l зависит от тока и условий, в которых горит дуга. Статические вольтамперные характеристики дуги имеют вид:

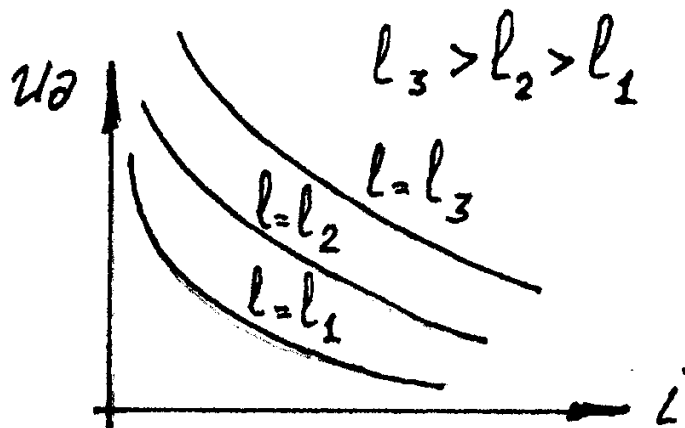


Рис. 1.

Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая вольтамперная характеристика. С ростом давления среды, в которой горит дуга, также увеличивается напряженность E и поднимается вольтамперная характеристика. Охлаждение дуги существенно влияет на эту характеристику. Чем интенсивнее охлаждение дуги, тем больше от нее отводится мощность. При этом должна возрастать мощность, выделяемая дугой. При заданном токе это возможно за счет увеличения напряжения на дуге. Таким образом, с ростом охлаждения вольтамперная характеристика поднимается. Этим широко пользуются в дугогасительных устройствах аппаратов.

б) Динамическая вольтамперная характеристика дуги.

В реальных установках ток может меняться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции дугового столба изменение сопротивления дуги отстает от изменения тока.

Зависимость напряжения на дуге от тока при быстром его изменении называется динамической вольтамперной характеристикой.

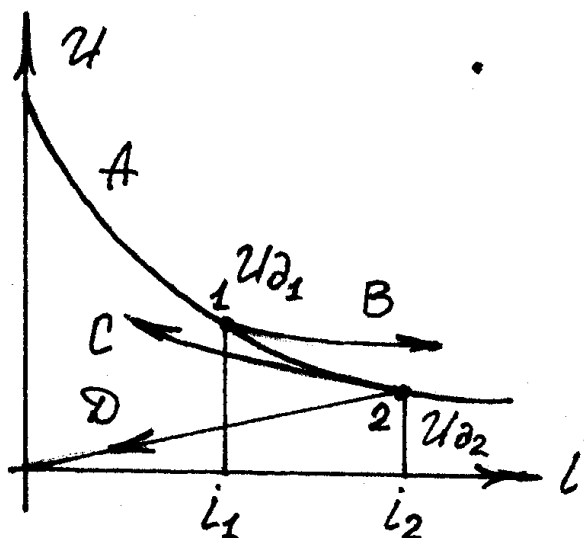


Рис.2

При возрастании тока динамическая характеристика идет выше статической (кривая В на рис. 2), так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении - ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая С на рис.2).

Динамическая характеристика в значительной степени определяется скоростью изменения тока в дуге. Если в цепь ввести очень большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то в течение времени спада тока до нуля сопротивление дуги остается постоянным. В этом случае динамическая характеристика изобразится прямой проходящей из точки 2 в начало координат (прямая Д), т.е. дуга ведет себя как металлический проводник, так как напряжение на дуге пропорционально току.

В реальном аппарате после размыкания контактов расстояние между ними меняется и дуга имеет переменную длину. В этом случае процесс отключения можно представить нижеследующим образом.

Разобьем путь, который проходит контакт, на участки и нанесем статические вольтамперные характеристики, соответствующие концу каждого участка (рис. 3). Если индуктивность цепи мала, то по мере увеличения длины дуги ток будет быстро принимать значения, соответствующие точке пересечения статических характеристик с прямой $U - iR$. В точке O ток достигнет критического значения. При дальнейшем увеличении длины дуги наступят условия для гашения.

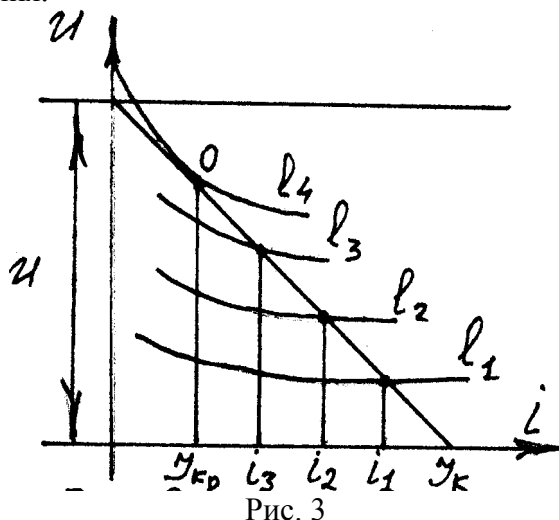


Рис. 3

Длина дуги, при которой статическая характеристика касается прямой $U - iR$, называется критической длиной дуги. После точки O ток быстро уменьшается до нуля, дуга гаснет.

В цепи с большой индуктивностью спадание тока из-за большой величины индуктивности замедляется; вольтамперная характеристика дуги сразу же после расхождения контактов поднимается выше прямой $U - iR$. В момент гашения дуги возможны большие перенапряжения.

При отключении активной нагрузки гашение происходит быстро, никаких перенапряжений не происходит.

2.3 Условия гашения дуги постоянного тока

В электрических аппаратах принимаются все меры к тому, чтобы дуга гасла в минимально короткое время. Очевидно, для гашения дуги при всех значениях тока напряжение $L \frac{di}{dt}$ должно быть отрицательно. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы

$$U_\delta > U - iR.$$

Это возможно либо за счет поднятия вольтамперной характеристики, либо за счет увеличения сопротивления цепи.

Вольтамперная характеристика дуги может быть поднята за счет увеличения длины дуги, интенсивного охлаждения, повышения давления среды, в которой горит дуга.

При замкнутых контактах дуга отсутствует, и ток в цепи равен $I_k = \frac{U}{R}$. При разведении контактов между ними возникает дуга с током I_2 . Если дуги и напряжение источника неизменны, то при увеличении сопротивления ток в цепи будет уменьшаться, принимая значения i_3 , i_4 и I_{kp} . При дальнейшем возрастании сопротивления соблюдается неравенство $U_\delta > U - iR$, т.е. создаются условия для гашения дуги.

Токи и сопротивления, при которых наступают условия для гашения, называются

критическими.

Если при неизменном значении тока цепи I_K увеличить напряжение питания U или при неизменном значении напряжения U увеличить ток цепи I_K , то прямая $U - iR$ будет проходить выше. Тогда для соблюдения условий гашения необходимо поднять вольтамперную характеристику дуги.

Таким образом, с ростом отключаемого тока и напряжения источника условия отключения утяжеляются.

Определим длительность t_∂ горения дуги.

Обозначим

$$\Delta U = \left| L \frac{di}{dt} \right|.$$

Тогда

$$t_\partial = L \int_{I_K}^0 \frac{di}{\Delta U}.$$

Таким образом, чем больше ΔU , тем меньше длительность горения дуги. Но увеличение ΔU ведет к росту напряжения на контактах в момент гашения дуги.

2.4 Энергия, выделяемая в дуге

Сопротивление дуги R_d независимо от рода тока можно считать чисто активным. Оно является величиной переменной, падающей с ростом тока, и может быть определено из вольтамперной характеристики дуги.

Сопротивление дуги

$$R_d = U_d / i. \quad (1)$$

Мощность электрической дуги

$$P_d = U i. \quad (2)$$

Энергия W_∂ , выделяемая в дуге за время t_r её горения

$$W_\partial = \int_0^{t_r} U_d i dt. \quad (3)$$

Для выключающих аппаратов весьма важно определить значение этой энергии за одно отключение. Подставив в выражение (3) значение U_d согласно формуле

$$(U = U_d + iR + L \frac{di}{dt}),$$

получим для дуги постоянного тока

$$W_d = \int_0^{t_r} R(I_0 - i) dt + \int_0^{t_r} L i dt = L \frac{I_0^2}{2} + \int_0^{t_r} R(I_0 - i) dt = W_M + W_r, \quad (4)$$

где $W_M = L \frac{I_0^2}{2}$ — энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой цепи; $W_r = \int_0^{t_r} R(I_0 - i) dt$ —

энергия, поступающая от генератора в дугу за время её горения; $I_0 = U/R$ — начальное значение тока.

Таким образом, независимо от способа гашения дуги постоянного тока в ней выделится энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой цепи, плюс еще какая-то доля энергии, которая поступит от генератора за время горения дуги (в устойчиво горящей дуге вся выделяющаяся в ней энергия поступает от генератора).

Изменение тока в дуге при отключении может быть охарактеризовано следующим эмпирическим выражением:

$$i = I_0 [1 - (t/t_r)^n]. \quad (5)$$

где t_r — время гашения; t — текущая координата; n — некоторая постоянная для данных

условий величина.

Графически уравнение (5) представлено семейством кривых на рис.4, а. Для дугогасительных устройств с узкими щелями и для закрытых дугогасительных устройств, а также при значительных индуктивностях $n > 1$ (порядка 2 — 4). Для открытых дугогасительных устройств и при активной нагрузке $n < 1$.

Подставив уравнение (5) в выражение для W_{Γ} , получим

$$W_{\Gamma} = k R I_0^2 t_{\Gamma} = L I_0^2 k, \quad (6)$$

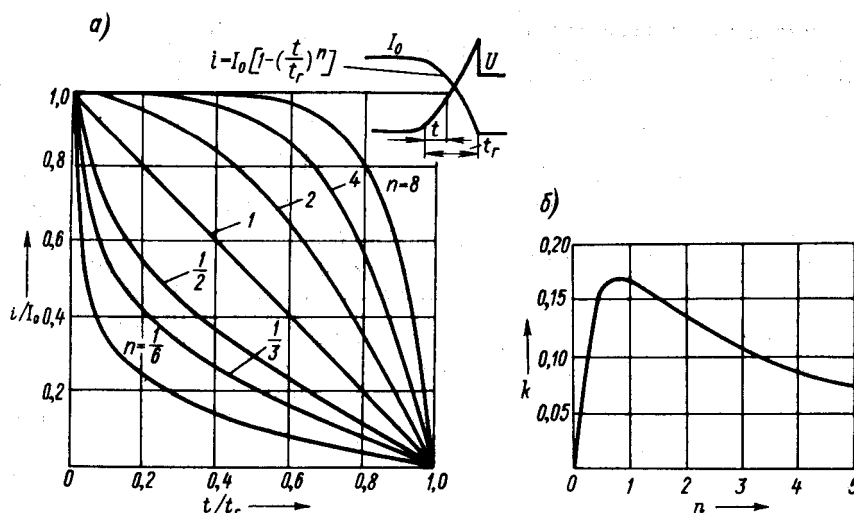


Рис.4: а - графическая интерпретация уравнения (5) и б - зависимость $k = f(n)$, где $k = n / (2n^2 + 3n + n)$; $T = L/R$ — постоянная времени отключаемой цепи

Кривая, характеризующая зависимость $k = f(n)$, приведена на рис.4, б. Энергия, поступающая в дугу от генератора, пропорциональна времени горения и зависит от коэффициента k , характеризующего в некоторой степени дугогасительное устройство. Максимальное количество энергии выделится в дуге при изменении тока по закону, близкому к линейному. При этом $k_{n=1} = 0,167$, а ток в цепи за время отключения меняется по линейному закону:

$$i = I_0 (1 - (t/t_r)).$$

Таким образом, энергия, выделяющаяся в дуге при отключении постоянного тока,

$$W_{\Gamma} = W_M + W_{\Gamma} = L \frac{I_0^2}{2} (1 + 2k \frac{t_{\Gamma}}{T}). \quad (7)$$

В дуге отключения переменного тока, если гашение происходит в момент перехода тока через нуль, выделится только энергия

$$W_{\Gamma} = (\frac{1}{\pi f} I_m U_{\Gamma}) m, \quad (8)$$

где f — частота; I_m — ток; U_{Γ} — падение напряжения на дуге; m — число полупериодов горения дуги.

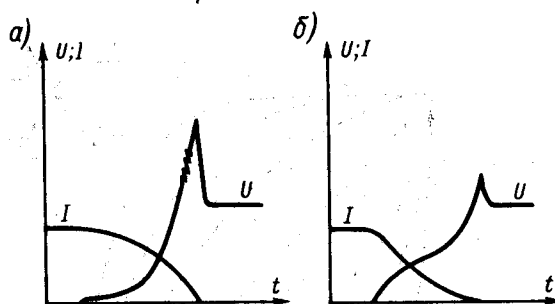


Рис.5. Характерные осциллограммы тока и напряжения при отключении цепи с большей (а) и малой (б) индуктивностью

Энергия, запасенная в магнитном поле отключаемой цепи, $L \frac{I_0^2}{2}$ возвращается в генератор. Минимальное количество энергии выделяется, если дуга погаснет при первом прохождении тока через нуль ($m = 1$). Если дуга начнёт гаснуть раньше естественного перехода тока через нуль, то часть энергии $L \frac{I_0^2}{2}$ не успеет вернуться в генератор и выделяется в дуге.

Таким образом, гашение дуги переменного тока в момент естественного прохождения тока через нуль облегчается и за счет меньшей энергии, выделяемой в дугогасительном устройстве.

При расчете дугогасительных устройств постоянного тока следует учитывать, что дугогасительное устройство должно быть способно принять и рассеять (отвести) выделяемую в дуге энергию, которая может быть весьма большой, в частности при отключении цепей обмоток возбуждения.

Индуктивность стремится поддержать неизменным протекающий по цепи ток, что приводит к автоматическому поддержанию напряжения, равного iR , пока не будет израсходована вся запасенная в цепи магнитная энергия. Чем больше индуктивность, тем трудней погасить дугу постоянного тока и тем больше будет напряжение на дуге при том же времени гашения. Характерные осциллограммы тока и напряжения на дуге при отключении цепей с различными индуктивностями приведены на рис.5.

2.5. Условия гашения дуги переменного тока

Рассмотрим цепь, у которой $\cos \varphi = 1$. Пусть контакты аппарата разошлись в точке a (рис.6).

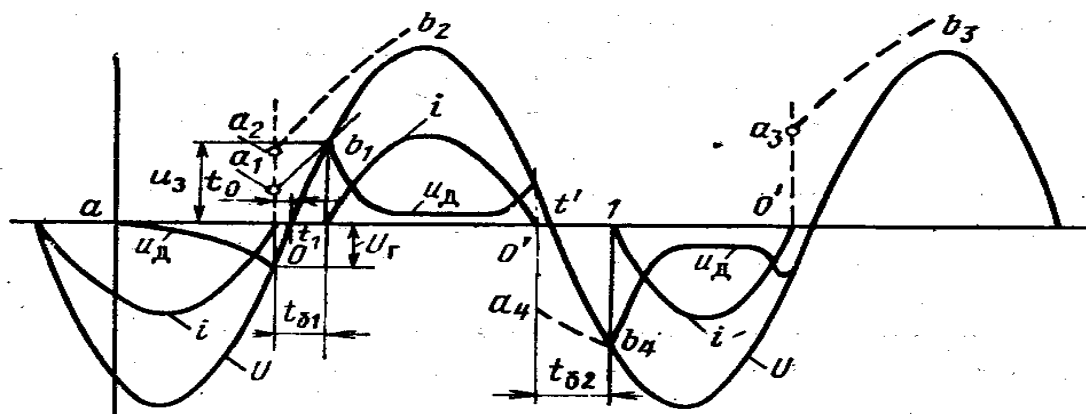


Рис.6. Процесс отключения активной нагрузки переменного тока

Между ними загорается дуга. К концу полупериода из-за уменьшения тока и воздействия дугогасительного устройства наблюдается увеличение сопротивления дугового промежутка и подъем напряжения на дуге. При подходе тока к нулю к дуге подводится малая мощность, температура ее уменьшается, что с одной стороны, ведет к замедлению термической ионизации, с другой - способствует деионизации. Все это приводит к погасанию дуги. Напряжение, при котором дуга гаснет, называется напряжением или **пиком гашения** U_g . Резкий подъем напряжения к концу полупериода ведет к тому, что ток в цепи обрывается до своего естественного прохождения через нуль.

После погасания дуги дуговой промежуток не превращается мгновенно в изоляционный, поскольку температура не снижается до нуля. В процессе гашения дуги число заряженных частиц в области дугового промежутка уменьшается; после гашения дуги сопротивление промежутка резко возрастает. При этом возрастает и *электрическая прочность промежутка*, т.е. такое напряжение, при котором происходит его электрический пробой.

После прохождения напряжения через нуль напряжение источника изменяет знак, и начинает расти по закону синусоиды.

Электрическая прочность промежутка начинает нарастать не с нуля, а со значения, соответствующего точке a_1 (начальная прочность промежутка). Начальная прочность и

дальнейший рост прочности зависит от свойств ДУ: чем эффективней оно действует, тем больше начальная прочность, тем круче идет нарастание этой прочности.

В момент t_1 напряжение на промежутке пересекает кривую прочности $a_1 b_1$. В этой точке дуга загорается вновь. Напряжение U_3 называется напряжением зажигания. В связи с тем, что ток в первой половине полуволны синусоидой возрастает, напряжение на дуге уменьшается. После прохождения током максимального значения напряжение на дуге начинает возрастать, поскольку ток уменьшается. Таким образом, кривая на дуге имеет седлообразную форму. При больших токах из-за сильной термической ионизации почти на протяжении всего полупериода горения дуги напряжение не изменяется. Только в начале и конце полупериода появляются пики зажигания и гашения.

В точке O дуга вновь гаснет и происходят процессы, аналогичные описанным ранее.

3 ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

3.1 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 решетки;
- 3) гашение дуги высоким давлением;
- 4) гашение дуги в масле;
- 5) гашение дуги воздушным дутьем;
- 6) гашение дуги в элегазе;
- 7) гашение дуги в вакууме.

3.2 Дугогасительные устройства постоянного и переменного тока

3.2.1 Широкие и узкие продольные щели

Весьма широкое распространение (особенно в низковольтных аппаратах) получили 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.

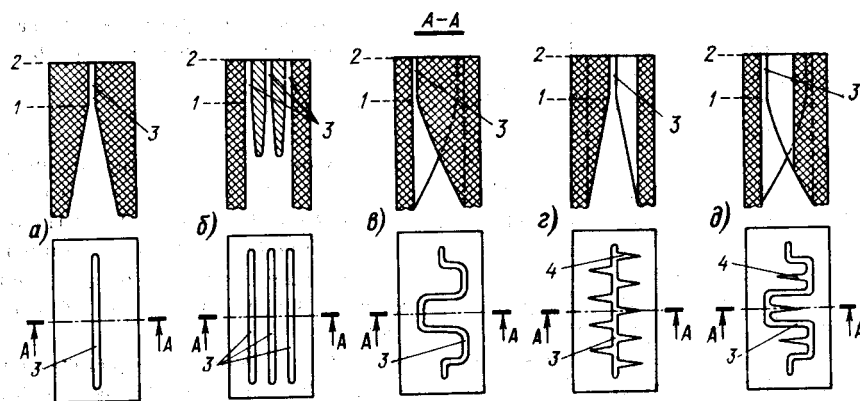


Рис.7. Характерные формы продольных щелей дугогасительных камер

На рис. 7 схематично изображены характерные формы продольных щелей камер ДУ. В , верхней части камеры (рис.7а) между точками 1 и 2 имеется одна прямая продольная щель 3 с плоскопараллельными стенками. В камере на рис.7б — несколько прямых параллельных щелей, аналогичные щели в камере на рис.7а. 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.

На рис.7в 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.7г.

Камера (рис.7д) 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.

3.2.2 Дугогасительные решётки

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

После расхождения контактов 1 и 2 (рис.8,б) возникшая между ними дуга 3 под воздействием магнитного поля¹ 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 ВАХ дуги и обеспечить условия её гашения.

На рис. 8 показаны различные схемы ДУ с дугогасительными решетками. В решетке на рис. 8,а дуга выводится на пластины и делится между ними с помощью магнитного поля напряженностью H , создаваемого специальной системой. В решетке на рис. 8,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. В конструкции рис.8,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.

3.2.3 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:

$$pv=10^5 \frac{L}{3} W_d, \quad (9)$$

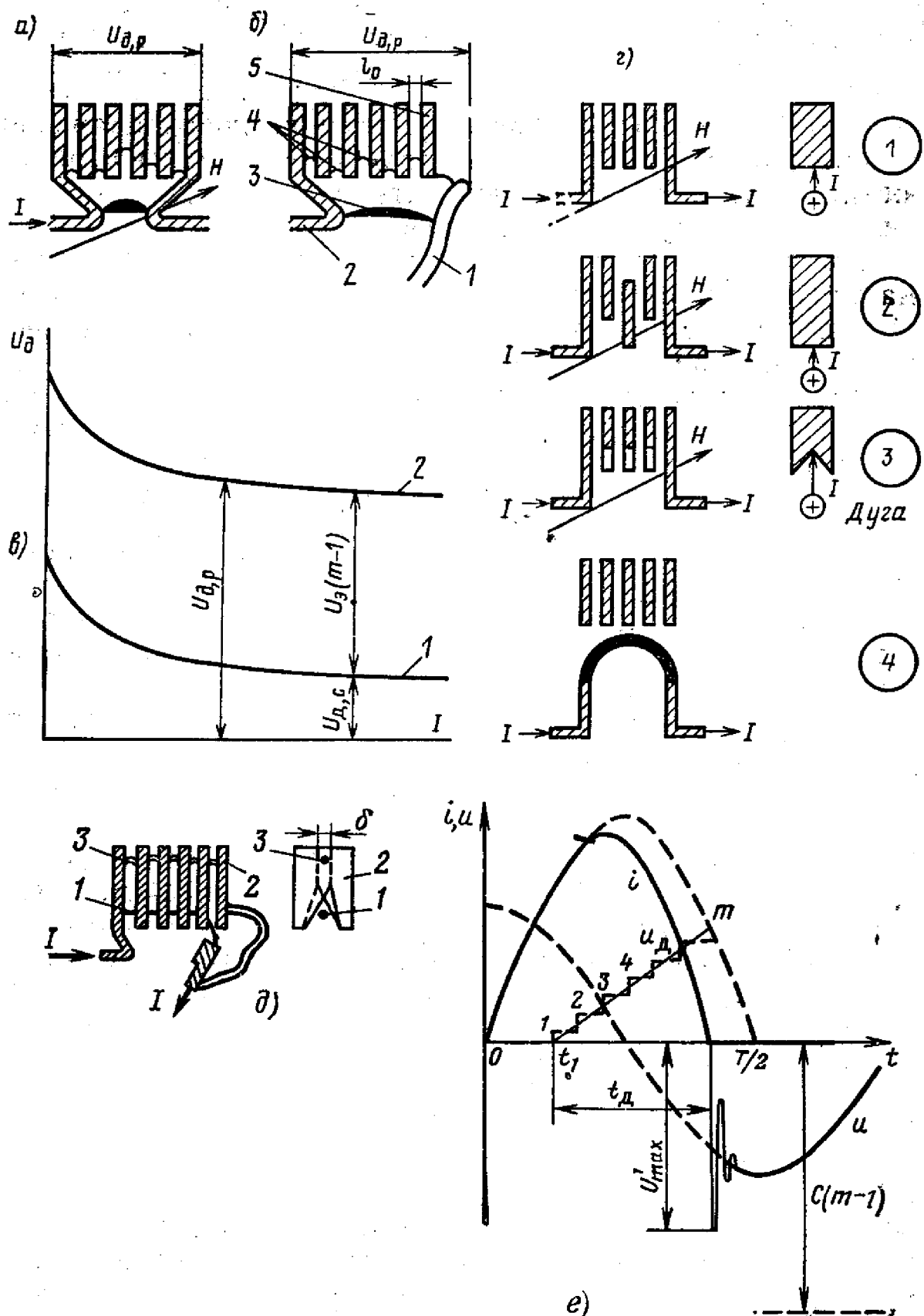


Рисунок 8 – Статические ВАХ электрической дуги в решётке и виды дугогасительных решёток: кривая 1 - напряжение на дуговых промежутках; кривая 2 – результирующее напряжение; где W_d — энергия дуги, Дж; v — объем, $см^3$; p — возникающее в камере давление, Па.

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

3.2.4 Гашение дуги в масле

Этот способ гашения нашёл широкое применение в выключателях переменного тока на ВН.

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

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

2. *Дуогасительные 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. *Дуогасительные 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 дуогасительные устройства первой группы, так как обеспечивают большую эффективность гашения при сравнительно несложных конструкциях.

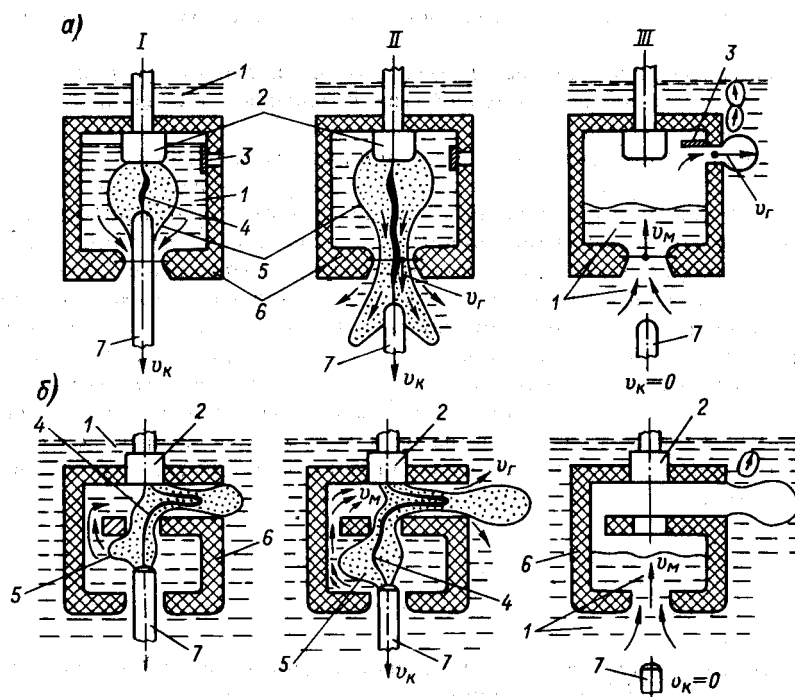


Рис. 9 – Схемы процесса гашения электрической дуги в камерах с автодутьем: а – камера продольного дутья; б – камера поперечного дутья: 1-масло; 2-неподвижный контакт; 3-клапан; 4-дуга; 5-газовый пузырь; 6-камера; 7-подвижный контакт

Принципиальные схемы работы простейших дуогасительных камер с автодутьем приведены на рис.9. 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.9, а) при выходе подвижной контакт-детали из камеры (положение II) или поперек дуги (*поперечное дутье* — рис.9,б) при наличии выхлопного отверстия, расположенного против места разрыва (положение II). 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.

3.2.5. Гашение дуги воздушным дутьем

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

Дуга, образующаяся между контактами, обдувается вдоль или поперек потоком воздуха под определенным давлением. 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.

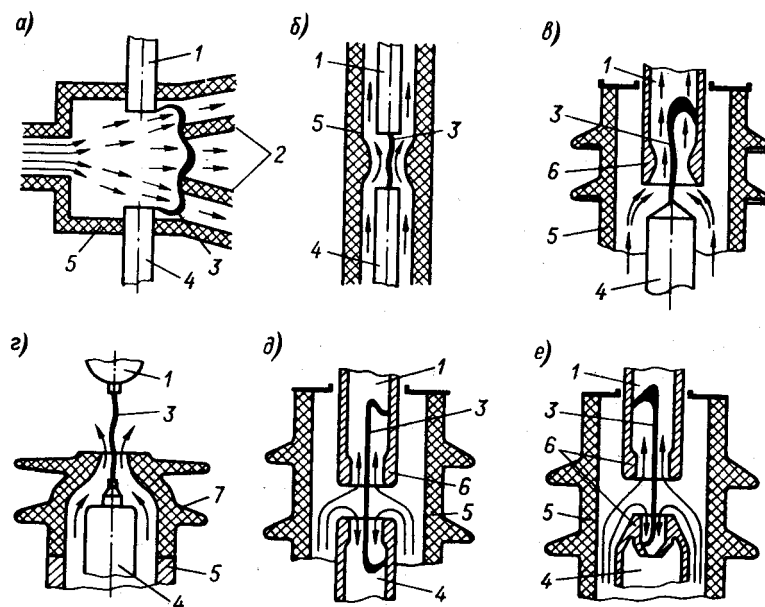


Рис. 10. Схемы камер с воздушным дутьем: а — поперечное дутье; б — продольное одностороннее в горловине камеры; в — продольное одностороннее через соплообразный контакт; г — продольное одностороннее через изоляционное сопло; д, е — продольное двустороннее через соплообразные контакты 1 — неподвижный 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.10, а), продольным — *продольное воздушное дутье* (рис.10, 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.10). 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. 6-20), 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 $u_x \ll 330$ 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.

3.2.6 Гашение дуги в элегазе

В последние годы все более широко в высоковольтных выключателях вместо воздуха применяется элегаз — электротехнический газ. Элегаз — шести-фторная 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) КРУ.

3.2.7 Гашение дуги в вакууме

Известно, что вакуум обладает высокими изоляционными и дугогасящими свойствами (рис. 11). 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 6-35кВ.

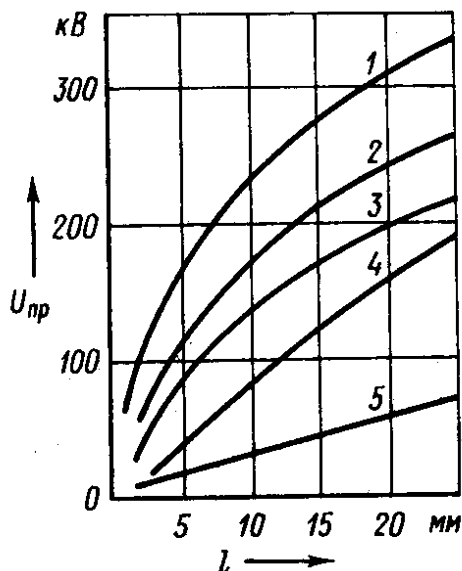


Рис. 11. Зависимость пробивного напряжения в различных средах от расстояния между электродами; 1 – вакуум; 2 – масло; 3 – фарфор; 4 – элегаз; 5 – воздух

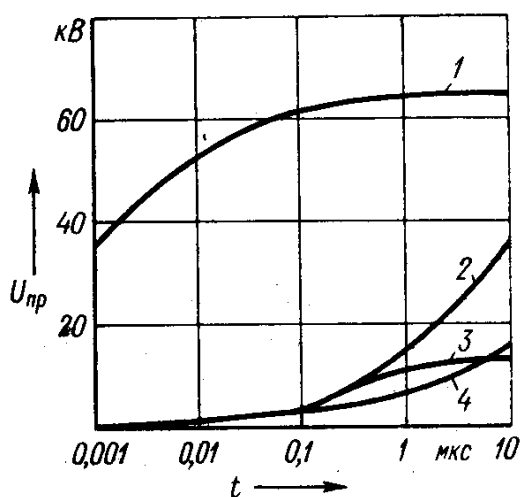


Рис. 12. Зависимость восстанавливающейся прочности в различных средах от времени; 1 – вакуум; 2 – элегаз; 3 – азот; 4 – водород

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 этому 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 рис. 12.

3.3 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 у нас 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.

3.3.1 Коммутация цепей переменного тока

Для аппаратов с высокой частотой оперативных включений и отключений заслуживает внимания контактная система с тиристорным блоком бездугового отключения (рис. 6-28). Тиристоры $VS1$ и $VS2$ включены параллельно контакту. При разомкнутом контакте K они заперты — ток в цепи отсутствует. При замыкании контакта и возникновении тока в цепи трансформаторы тока $TA1$ и $TA2$ (или другое устройство) через диоды $VD1$ и $VD2$ подают соответственно полярности полуволны отпирающие сигналы на управляющие электроды тиристоров. Однако ток через тиристоры не протекает, так как они шунтированы контактом. В момент размыкания контакта ток переходит в цепь того из тиристоров, направление проводимости которого соответствует полярности тока. Прямое падение напряжения, на открытом тиристоре мало (1,5 — 2 В на одном тиристоре), и дуга на контактах не возникает. При переходе тока через нуль проводящий тиристор закроется, а второй не откроется ввиду отсутствия сигнала. Ток в цепи прекратится. Коммутационная износостойкость контактов при этом способе гашения сильно возрастает (например, у контакторов серий КТ64 и КТ-65 — в 10 раз).

Так как тиристоры обтекаются здесь током только в течение полупериода, то они могут выбираться на малые номинальные токи с большими перегрузками. Габариты тиристорного блока оказываются малыми.

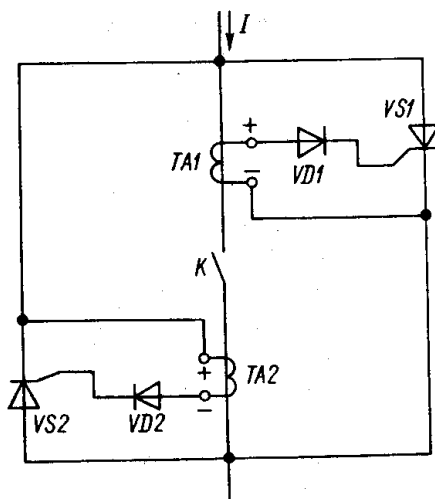


Рис. 13. Схема бездугового отключения с шунтирующими тиристорами

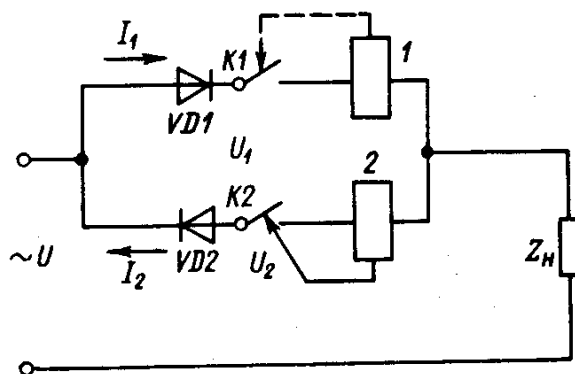


Рис. 14. Схема коммутационного устройства с синхронизированным размыканием контактов и бездуговым отключением

Принципиальная электрическая схема коммутационного устройства с синхронизированным размыканием контактов приведена на рис. 14.

Контакты $K1$ и $K2$ замыкаются и удерживаются в замкнутом положении приводом. Встречно-параллельно включенные диоды $VD1$ и $VD2$ представляют собой незначительное нелинейное симметричное малоинерционное сопротивление, они не искажают форму тока и не влияют на него. Ток протекает в параллельных цепочках в соответствии с полярностью диодов. При отключении привод освобождает подвижные контакт-детали, предоставляя возможность контактам $K1$ и $K2$ разомкнуться с помощью своих отжимающих пружин. Контролирующие электромагниты 1 и 2 удерживают контакты замкнутыми до перехода тока через нуль и до закрытия диодов. Если в момент отключения привода ток проходит через электромагнит 2 , то контакт $K2$ удерживается в замкнутом положении до конца полупериода, а контакт $K1$ размыкается одновременно с приводом. Аналогично происходит, если в момент отключения привода ток протекает через электромагнит 1 : контакт $K2$ (обесточенный) отключается одновременно с приводом, а контакт $K1$ — в конце полупериода тока, проходящего по нему.

Контролирующие электромагниты обеспечивают размыкание контактов не синхронно с приводом, а в паузу тока, создаваемую диодами после перехода тока через нуль.

Устраняя электрическую дугу, устройство, выполненное по этой схеме, обеспечивает высокую изолирующую способность межконтактного промежутка в отключенном состоянии (контакты разомкнуты) и малое сопротивление во включенном состоянии. При больших токах это устройство может быть использовано как дугогасительный контакт, у которого основной контакт отключается одновременно с приводом, а контакты $K1$ и $K2$ — соответственно полупериоду протекающего по ним тока.

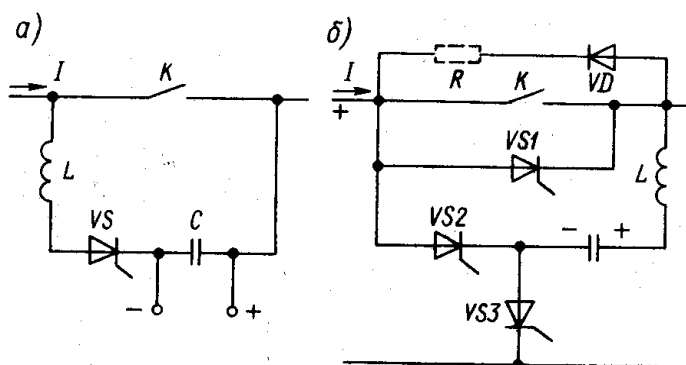


Рис. 15. Схемы бездуговой коммутации на постоянном токе

3.3.2 Коммутация цепей постоянного тока

Отключение постоянного тока представляет собой процесс принудительного его обрыва. Схемы, обеспечивающие либо ограничение времени горения дуги, либо полностью бездуговую коммутацию, многообразны и сложны. Они основаны, как правило, на конденсаторном гашении в сочетании с искусственной коммутацией тиристоров.

В схемах, выполненных по принципу, показанному на рис. 15, а, после размыкания контакта K открывается тиристор VS . Заранее заряженный конденсатор C разряжается через дугу и катушку индуктивности L , благодаря чему ток в дуге дважды меняет свое направление. В один из переходов тока через нуль возможно гашение дуги. Такие схемы при токах свыше 100 А требуют значительных емкостей (конденсатор имеет большие габариты и время заряда), обеспечивают только сокращение времени горения дуги и, таким образом, малоэффективны.

В схемах, подобных показанной на рис. 15б, процесс отключения цепи двухступенчатый: сперва открывается тиристор $VS1$, ток переводится в цепь тиристора и контакт K размыкается без дуги. Затем открытием тиристора $VS2$ осуществляется разряд конденсатора C и запираание тиристора $VS1$, достигается полное бездуговое отключение тока.

Во всех случаях амплитуда тока разряда конденсатора должна быть больше тока цепи. Цепь диода VD и резистора R служит для снижения напряжений и повышения отключающей способности, тиристор $VS3$ — для заряда (одна из схем) конденсатора.

Бездуговая коммутация цепей постоянного тока в сочетании с другими мероприятиями позволяет проектировать выключатели с полным временем отключения не более 0,01 с, а также повышать коммутационную износостойкость аппаратов (для контакторов — в 5 — 10 раз).

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ И ИХ РЕЖИМЫ РАБОТЫ

4.1 Общие сведения

Электрическим контактом называется соединение двух проводников, позволяющее проводить ток. Соприкасающиеся проводники называются контакт-деталью или просто контактами.

Как бы ни была тщательно обработана поверхность соприкосновения контактов, электрический ток проходит из одного контакта в другой только в отдельных точках, в которых эти поверхности касаются, так как абсолютно гладкой поверхности нельзя получить ни при каком методе ее обработки.

Рассмотрим процесс перехода тока из одного контакта в другой при касании двух цилиндрических контактов по торцам.

Положим, что контакты имеют только одну площадку касания и что эта площадка имеет форму круга с радиусом a . Величину радиуса a при пластической деформации можно найти по формуле

$$\pi \cdot a^2 = \frac{F}{G}$$

где: F - сила нажатия контактов; G - временное сопротивление на смятие материала контактов.

В результате стягивания линий тока к площадке касания путь тока меняется. Сечение проводника, через которое фактически проходит ток, становится меньше, что вызывает увеличение сопротивления. Сопротивление в области точки касания, обусловленное явлениями стягивания тока, называется переходным сопротивлением контакта.

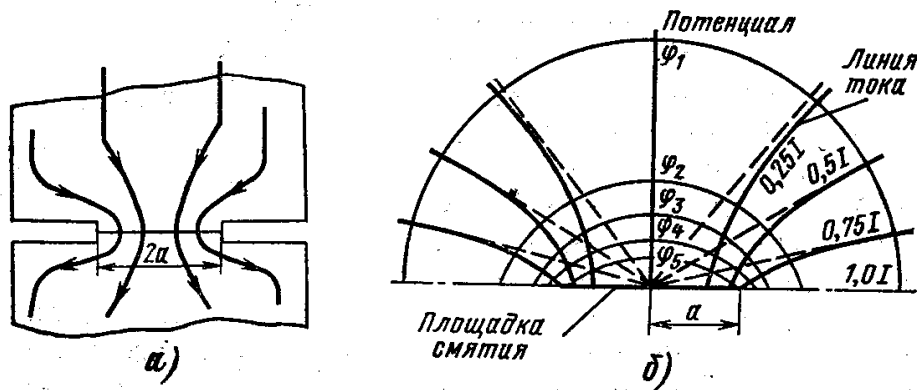


Рис. 16. Идеализированная картина растекания тока в точечном контакте

Картина растекания тока в области стягивания (рис. 2.2.1.а) аналогична картине растекания тока из плоского диска радиусом a полубесконечную среду. Учитывая, что размеры области стягивания малы по сравнению с размерами тела контакта, реальные контакты можно заменить полубесконечными телами. Для двух полубесконечных тел, контактирующих по одной круглой площадке касания, картина поля тока и электрических потенциалов представлена на рис. 16б.

Эквипотенциальные поверхности являются полуэллипсоидами вращения, линии тока гиперболами с общим фокусом. Для такой идеализированной картины растекания тока в контактах переходное сопротивление

$$R_{II} = \frac{\rho}{2a},$$

где ρ - удельное сопротивление.

С точностью до 5% эта формула справедлива, если поперечные размеры тела контакта превосходят в 13 раз диаметр площадки касания. Определив a , имеем

$$R_{II} = \frac{\rho\sqrt{\pi G}}{2\sqrt{F}} = \frac{r}{F^{\frac{1}{2}}}$$

Если имеет место упругая деформация контактирующих выступов, то $F^{\frac{1}{3}}$.
Для многоточечных контактов

$$R_{II} = \frac{r}{F^m},$$

где m – показатель, меняющийся от 0,7 до 1.

Соппротивление R_{II} зависит и от обработки поверхности, Шлифовка ведет к тому, что на поверхности остаются более пологие выступы с большим сечением. Снятие таких выступов возможно только при больших силах нажатия. Поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Мы рассмотрели только переходное сопротивление, вызванное явлением стягивания линий тока.

В действительности контактирующие поверхности покрыты адсорбированными молекулами газа, в котором располагались контакты до их замыкания. Очень часто эти молекулы вступают в химическую реакцию с материалом контактов, в результате чего на поверхности металла могут возникнуть пленки с очень высоким удельным сопротивлением.

Если напряжение замыкаемой цепи мало или нажатие на контакты недостаточно, то иногда контакты вообще не пропускают тока. Как только свежезачищенная поверхность контактов соприкасается с воздухом, сейчас же начинается процесс образования пленки и переходное сопротивление может возрасти в десятки раз.

В связи с этим контакты на малые точки (малые нажатия) изготавливаются из благородных металлов, не поддающихся окислению (золото, платина и др.).

В сильноточных контактах пленка окислов разрушается либо благодаря большим нажатиям, либо путем самозачистки при включении за счет проскальзывания одного контакта относительно другого.

При прохождении тока через область стягивания линий тока контакт нагревается. С ростом температуры сопротивление стягивания изменяется из-за роста удельного сопротивления материала

$$R(\theta) = R(O) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta \tau_K \right),$$

где $R(O)$ - сопротивление стягивания при температуре тела контакта $\theta_0 + \tau_T$.

Возрастание превышения температуры контактной точки $\Delta \tau_K$, приводит к увеличению сопротивления R_{II} .

4.2 Режимы работы контактов

4.2.1 Включение цепи

При включении контактов могут иметь место следующие процессы:

- 1) вибрация контактов;
- 2) эрозия в результате образования разряда между сходящимися контактами.

При включении контактов могут иметь место следующие процессы:

- 3) вибрация контактов;
- 4) эрозия в результате образования разряда между сходящимися контактами.

Рассмотрим природу вибраций на примере рис. 17. Подвижный контакт 1 связан с контактным рычагом 2 через контактную пружину 3. Неподвижный контакт 4 жестко закреплен на опоре.

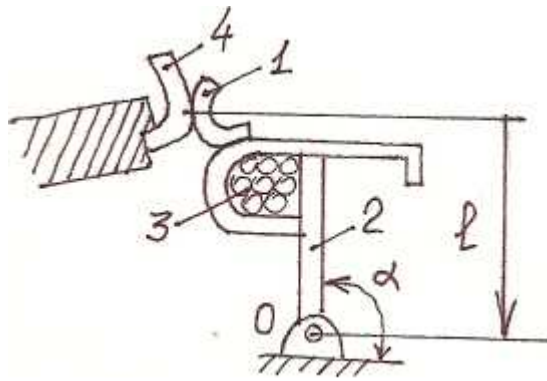


Рис. 17.

Электромagnet контактора воздействует на рычаг 2. В момент сопротивления контактов происходит удар, в результате которого происходят деформация смятия контактов и отброс контакта 1 вправо. Между контактами образуется зазор и загорается дуга. Движение контакта 1 вправо прекратится тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины 3. После этого контакт 1 под действием пружины 3 начнет перемещаться влево. Произойдет новый удар и новый отброс контакта.

Вибрация контактов - явление весьма вредное, поскольку при этом имеет место многократное образование короткой дуги, которая ведет к сильному сплавлению и распылению контактов. В связи с износом контактов уменьшается их взаимное нажатие в полностью включенном положении, что приводит к повышению переходного сопротивления. При большом числе включений и отключений возможен быстрый выход из строя контактов.

Для уменьшения вибрации контактная пружина имеет предварительную деформацию (натяг) при разомкнутых контактах. В момент касания контактов сила нажатия возрастает не с нуля, а с величины предварительного начального нажатия контактов. В некоторых конструкциях между контактным рычагом и подвижным контактом вводится противовибрационный вкладыш из специального пористого материала типа губчатой резины. Этот материал увеличивает затухание колебаний контакта и способствует уменьшению вибраций.

На вибрацию контактов влияет также момент инерции, с ростом которого вибрация усиливается. В связи с этим контакты должны быть возможно легкими.

С целью снижения вибраций, возникающих от удара якоря, магнитопровод с обметкой крепится не жестко, а на пружинах.

При включении на существующее короткое замыкание вибрация контактов усиливается из-за возникновения отбрасывающих сил в точке касания. Для того чтобы не было сплавления контактов в момент их соприкосновения, необходимо силой предварительного натяга контактной пружины компенсировать электродинамические силы отброса и создать такое нажатие, при котором падение напряжения на переходном сопротивлении не приводит к плавлению касания.

При включении цепи по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между контактами и при определенном расстоянии произойдет пробой промежутка. В аппаратах НН пробой возникает при очень малом расстоянии между контактами.

В дуговую форму разряд не переходит, так как подвижный контакт продолжает двигаться и, замыкая промежуток, прекращает разрядные процессы. Однако возникающие при пробое электроны бомбардируют анод и вызывают его износ. Металл анода откладывается на катоде в виде тонких игл.

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

В аппаратах ВН при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникшая дуга горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов, особенно при включении на существующее короткое замыкание. За счет применения большого числа

последовательно соединенных разрывов уменьшается напряжение, приходящееся на разрыв, что дает снизить время предварительного пробоя до безопасного значения.

4.2.2 Проведение тока во включенном состоянии

В этом режиме следует различать два случая: через контакты проходит длительный номинальный ток и через контакты проходит ток КЗ.

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе I_H падение напряжения на сопротивлении было меньше U_{K1} :

$$I_H R_{\Pi} \leq U_{K.\dot{don}} = (0.5 \dots 0.8) U_{K1},$$

где $K1$ – точка размягчения материала; $K2$ - точка плавления материала.

Для расчета контактов на небольшие токи используется эта формула. По заданному току I_H и допустимому $U_{K.\dot{don}}$ определяем R_{Π} , после чего находим необходимое контактное нажатие.

Для одноточечных контактов на большие токи

$$F_K = I_H^2 \cdot \frac{B \cdot \pi \cdot H_K \cdot 10^7}{16 \lambda^2 \cdot \left(\arccos \frac{T_0}{T_K} \right)^2},$$

где: F_K - сила нажатия; I_H - ток действующий; B - число Лоренца $2.42 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{B^2}{(^\circ C)^2}$; H_K - число твердости по Виккерсу; λ - удельная теплопроводность; T_K - температура точки касания; T_0 - температура тела контакта.

Формула позволяет по заданному I_H сразу найти F_K , если известно соотношение $\frac{T_0}{T_K}$

$$T_0 = \left(\frac{I^2 \cdot \rho}{k_T \cdot p \cdot q} + \theta_0 + 273 \right),$$

где: I - действующее значение тока; ρ - удельное сопротивление материала контактов; k_T - удельный коэффициент теплоотдачи; p - периметр сечения контактов; q - сечение тела контактов; θ_0 - температура окружающей среды.

Температуру контактной точки можно определить, воспользовавшись, что для надежно работающих контактов $T_K - T_0$ не должна превышать 5 - 10°C.

Если имеется n контактных точек, то расчет проводится для одной контактной точки (ток $\frac{I_H}{n}$) и

$$F_{K.\text{полн}} = F_K \cdot n$$

При расчете динамической стойкости контактов

$$I \leq r \sqrt{F},$$

где: I - ток электродинамической стойкости; F - сила нажатия; r - коэффициент, определенный экспериментально, и сведен в таблицу для различных материалов контактов.

Сваривание контактов зависит от конструкции самих контактов и токоведущей цепи аппарата. Электродинамические силы, возникающие в токоведущих частях, необходимо использовать для повышения устойчивости контактов.

4.2.3 Отключение цепи

При размыкании контактов сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает, и поэтому растет температура точек касания. В момент разъединения контактов температура достигает температуры плавления и между контактами возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает либо дуговой разряд, либо тлеющей.

Это приводит к интенсивному окислению, распылению материала контактов в окружающее пространство, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок, что влечет износ контактов.

Износ, связанный с окислением, образованием на электродах пленок химических соединений материала контактов со средой называется химическим износом или коррозией. Перенос материала с анода на катод называется положительной эрозией и наоборот отрицательной эрозией.

Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависят от вида разряда и величины тока.

При $I \leq 5 \cdot A$ срок службы контактов

$$N = \frac{0.6V_0 \cdot \nu}{\nu_K \cdot q_0},$$

где: N - число допустимых отключений; V_0 - объем контакта, предназначенный на износ; ν - плотность материала; ν_K - эмпирический коэффициент износа; q_0 - количество электричества, протекающего через промежуток за одно отключение.

Количество электричества, протекающего через дугу

$$q_0 = \int_0^{t_r} i \cdot dt$$

и находится на осциллограмме.

При ориентировочных расчетах

$$q_0 = \frac{1}{2} I_0 \cdot t_r,$$

где: I_0 - значение тока в момент размыкания; t_r - время гашения.

При $I > 5A$

$$Q = 10^{-9} r_n \cdot N \cdot I_0^2,$$

где: Q - износ контакта; N - число отключений - включений (операций); I_0 - ток отключения; r_n - эмпирический коэффициент; определенный: для различных материалов.

4.2.4 Способы уменьшения износа контактов

Основными средствами борьбы с эрозией в аппаратах на токи от 1 до 600 А являются:

- 1) сокращение длительности горения дуги за счет применения дугогасительных устройств;
- 2) устранение вибрации при включении;
- 3) применение дугостойких контактных материалов.

Для контактов, управляющих токами от долей ампера до нескольких ампер, применяются схемные методы уменьшения эрозии. Наиболее распространенные схемы приведены на рис. 2.2.

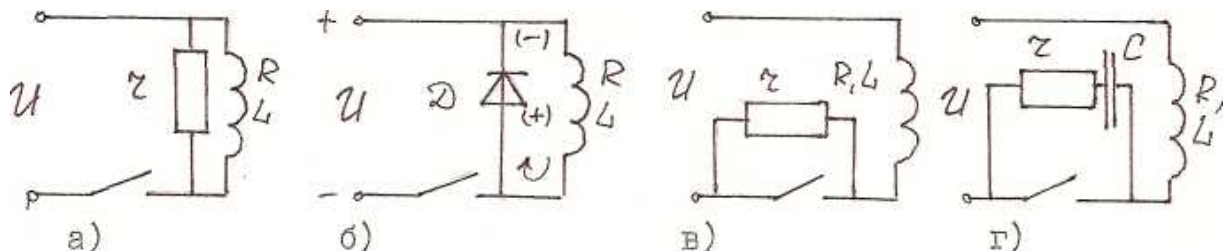


Рис. 18. Схемы для уменьшения износа контактов

Вся электромагнитная энергия цепи при отключении выделяется в дуговом промежутке. Исследования показали, что чем меньше эта энергия, тем меньше эрозия контактов. В схеме рис. 18а электромагнитная энергия, накопленная на индуктивности L , тратится в активных сопротивлениях r и R . Искра отсутствует, если

$$r \leq \left(\frac{300}{U} - 1 \right) R.$$

Дуга отсутствует при условии

$$r \geq \frac{U - U_0}{I_0 \frac{U}{R}},$$

где U_0 и I_0 берутся по таблице. Наличие резистора r увеличивает токовую нагрузку контактов, что является недостатком схемы. В связи с широким выпуском высококачественных диодов рекомендуется схема рис. 18б. В этой схеме контакты нагружаются только током $\frac{U}{R}$ и

обратным током диода D . При отключении магнитный поток в системе начинает падать. При этом обмотка будет закорочена на сопротивление диода в проводящем направлении. Для схемы рис. 18в. выполнено условие отсутствия искрового разряда, если

$$r \leq \frac{300}{U} R$$

Однако с уменьшением r растет ток, который должен отключаться другими контактами для полного обесточивания цепи. Хорошие результаты дает схема рис. 18г. Наличие конденсатора уменьшает ток между контактами, так как в конденсатор ответвляется ток, равный $C \frac{dU}{dt}$; где U - напряжение на контактах. Наличие емкости снижает скорость нарастания напряжения на контактах, в результате чего разряд может прекратиться. При замыкании цепи возможна сильная эрозия за счет энергии конденсатора, разряжающегося на промежуток. Для ограничения тока разрядки ставится сопротивление r .

При правильном выборе r и C эрозия должна отсутствовать.

Для обеспечения гашения дуги и уменьшения обгорания контактов сильноточные аппараты (контакты, автоматы, высоковольтные выключатели) снабжаются дутогасительными камерами.

С этой же целью подвижный контакт должен иметь определенную скорость движения и определенный ход в зависимости от конструкции аппарата и его номинального напряжения.

4.3 Материалы контактов

К материалу контактов предъявляются следующие требования:

1. Высокие электрическая проводимость и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии в воздухе и других средах.
3. Стойкость против образования пленок с высоким удельным сопротивлением.
4. Малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия.
5. Высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях.
6. Малая эрозия.

7. Высокая дугостойкость (температура плавления).
8. Высокие значения тока и напряжения, необходимых для дугообразования.
9. Простота обработки, низкая стоимость.

К таким материалам относятся медь, серебро, алюминий, вольфрам, металлокерамические материалы. Данные материалы имеют как положительные стороны, так и недостатки. Поэтому, исходя из этого, каждый из перечисленных материалов применяется с учетом большего эффекта по перечисленным требованиям.

4.4 Конструкция твёрдометаллических контактов

Жесткие. Контакты служат для неподвижного соединения токоведущих деталей. Сюда относятся шинные соединения, соединения кабелей, места присоединения аппаратов цепи. В процессе эксплуатации оба контакта связываются с помощью болтов, либо с помощью горячей или холодной сварки.

Неразмыкающиеся контактные соединения подвижных элементов. Такие соединения используются либо для того, чтобы передать ток с подвижного контакта на неподвижный, либо для того, чтобы дать возможность элементу неподвижного контакта тлеть небольшое перемещение под действием подвижного контакта. Наиболее простым соединением такого типа является гибкая связь. При больших ходах подвижных контактов к большим номинальным токам применяются скользящие и роликовые токосъемы.

Разрывные контакты. Конструкция разрывных контактов определяется значениями $I_{НОМ}$, $U_{НОМ}$, тока КЗ, режимом работы, назначением аппарата и рассмотрена в разделах, посвящённых устройству различных аппаратов.

Герметизированные контакты (герконы).

4.5 Жидкометаллические контакты

Наиболее характерные недостатки твердометаллических контактов следующие:

1. С ростом длительного номинального тока возрастают необходимые значения контактного нажатия, габариты и масса контактов. При токах 10 кА и выше резко увеличиваются габариты и масса аппарата в целом.
2. Эрозия контактов ограничивает износостойкость аппарата.
3. Окисление поверхности и возможность приваривания контактов понижают надежность аппарата. При больших токах КЗ контактные нажатия достигают больших значений, что увеличивает необходимую мощность привода, габариты и массу аппарата.

Рассмотрим принцип действия контактора с жидкометаллическим контактом (ЖМК) (рис. 2.3). Внешняя цепь подключается к электродам 1 и 2. Корпус 3 выполнен из электроизоляционного материала. Полости корпуса заполнены жидким металлом 4 и соединяются между собой отверстием 5. Внутри полостей корпуса плавают пустотелые ферромагнитные цилиндры 6. При подаче напряжения на катушку 7 цилиндры 6 опускаются вниз. Жидкий металл поднимается и через отверстие 5 соединяет электроды 1 и 2, контактор включается.

По сравнению с твердометаллическими ЖМК обладают следующими преимуществами:

1. Малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела жидкий металл — электрод (до 120 А/мм²), что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах.

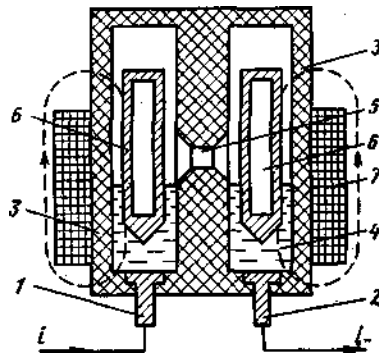


Рис. 19. Контактор с жидкометаллическим контактом

2. Отсутствие вибрации, приваривания, залипания и окисления контактов при их коммутации.

3. Высокая механическая и электрическая износостойкость ЖМК, что позволяет создавать аппараты с большим сроком службы.

4. Возможность разработки коммутационных аппаратов на новом принципе [автоматический восстанавливающийся предохранитель и др.] благодаря свойствам текучести жидкого металла.

5. Возможность, работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

К электрическим аппаратам обычно предъявляется требование сохранять работоспособность в интервале температур $\pm 40^\circ \text{C}$. Очевидно, что жидкий металл должен сохранять свое состояние в. указанном интервале. Из известных материалов только ртуть находится в жидком виде при температуре ниже 0°C и может быть в чистом виде пригодна для ЖМК. Высокая токсичность паров ртути существенно осложняет технологию ее применения.

В ЖМК перспективно применение диэлектрического или металлокерамического твердого каркаса, пропитанного жидким металлом.

Весьма перспективным является применение ЖМК в самовосстанавливающихся предохранителях.

Необходимо отметить и недостатки ЖМК:

1. Обычно применяемые контактные материалы галлий и его сплавы с другими металлами требуют подогрева контактов до момента включения, так как температура окружающей среды может быть ниже температуры затвердевания этих материалов.

2. Большинство аппаратов с ЖМК требуют определенного положения в пространстве и подвержены влиянию сторонних механических воздействий (ударов, вибраций), что затрудняет их применение.

4.6 Расчёт контактов аппаратов

Пример 1. Контакты образованы двумя торцами медных цилиндров с диаметром $d=0,03$ м. Определить контактное нажатие при длительном токе 1000 А и токе КЗ 30 кА. Температура окружающей среды $\theta_0=40^\circ \text{C}$.

Необходимое контактное нажатие, Н, если исходить из длительного режима работы, по (3.10)

$$F_K = I_H^2 \cdot \frac{B \cdot \pi \cdot H_K \cdot 10^7}{16\lambda^2 \cdot \left(\arccos \frac{T_0}{T_K} \right)^2},$$

где $I_{ном} = 1000$ А; теплопроводность меди $\lambda = 3,9 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м $\cdot^\circ \text{C}$); $B=2,42 \cdot 10^{-8}$ (В/ $^\circ \text{C}$) 2 ; HV — число твердости по Виккерсу, равное $37 \cdot 10^7$ Па [18.2]; $\kappa_T = 12$ Вт/(м $^2 \cdot ^\circ \text{C}$) (табл. 2.1).

Температура тела контакта

$$T_0 = \theta_0 + 273 + \left(\frac{I^2 \cdot \rho}{k_T \cdot p \cdot q} \right);$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta_T) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 70) = 1,99 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,03^2}{4} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$p = \pi d = \pi \cdot 0,03 = 9,45 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

Согласно 3.2. $T_K - T_0 = 5 - 10 \text{ К};$

$$F_K = 1000^2 \cdot \frac{2,42 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 37 \cdot 10^7}{16 \cdot 3,9^2 \cdot \left(\arccos \frac{338}{348} \right)^2} = 382 \text{ Н.},$$

Необходимое контактное нажатие с учетом тока КЗ согласно (3.12) $F_K \geq i_{y0}^2 / \kappa_2^2$;
 $i_{y0} = 1,8\sqrt{2} \cdot 30 \cdot 10^3 = 76,5 \cdot 10^3 \text{ А}$. Торцевой контакт, образуемый касанием торцов двух стержней, может рассматриваться как пальцевый несамоустанавливающийся контакт. Согласно табл. 3.2 $\kappa_2=1300$, следовательно,

$$F_K \geq 5820 \cdot 10^6 / (169 \cdot 10^4) = 3340 \text{ Н.};$$

Таким образом, данная система при контактном нажатии $382 < 3340 \text{ Н}$ неустойчива при КЗ. Если в конструктивных соображениях контактное нажатие нельзя увеличить до 3440 Н , то надо либо переходить на розеточную или многопальцевую контактную систему, либо заменить медь на металлокерамику. Так, при использовании металлокерамики КМК-Б21 усилие 510 Н достаточно при ударном токе $76,6 \text{ кА}$.

Пример 2. Определить необходимое давление серебряных однотоочечных контактов. Длительный ток 10 А . Ток КЗ 100 А ,

Для надежной работы контактов согласно (3.8)

$$I_{НОМ} R_K \leq 0,5 U_{K1} < 0,5 \text{ В/м.}$$

Для серебра при $U_{K1}=0,09 \text{ В}$ (табл. 3.1), $U_{K \text{ ДОП}}=0,045 \text{ В}$; $R_K=0,045/10=0,0045 \text{ Ом}$.

Для однотоочечного контакта при $R_K=k_1/F_K^{1/2}$ [формула (3.3)], $k_1=0,006$ (§ 3.1) $F_K = (k_1/R_K^2)^2 = (0,006/0,045)^2 = 1,68 \text{ Н}$.

Для ориентировочного расчета можно принять, что условия неприваривания для серебряных контактов такие, же, как и для медных, так как физические параметры материалов достаточно близки:

$$i_{y0} = 255 \text{ А}; \quad \kappa_2 = 1300 \text{ (табл. 3.2)}; \quad F_K = 255^2 / (169 \cdot 10^4) = 0,0378 \text{ Н}.$$

Поскольку контактное нажатие по номинальному току $F_{K.НОМ} = 1,68 \text{ Н}$ больше контактного нажатия, определяемого по току КЗ $F_K = 0,0378 \text{ Н}$, то выбираем нажатие $F_{K.НОМ} = 1,68 \text{ Н}$.

5 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

5.1 Общие сведения

При КЗ в сети через токоведущую часть аппарата могут проходить токи, в десятки раз превышающие номинальный ток. Эти токи, взаимодействуя с магнитным полем, создают электродинамические силы, которые стремятся деформировать как сами проводники, так и изоляторы, на которых они крепятся.

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять силам, возникающим при прохождении токов КЗ.

Эта величина может выражаться либо непосредственно амплитудным значением тока $i_{дин}$, при котором механические напряжения в деталях аппарата не выходят за пределы допустимых значений, либо краткостью этого тока относительно амплитуды номинального тока.

$$R_{дин} = \frac{i_{дин}}{\sqrt{2} \cdot I_H}.$$

Иногда динамическая стойкость оценивается действующим значением ударного тока за период после начала КЗ.

5.2 Методы расчёта электродинамических усилий (ЭДУ)

Методы расчёта. Для расчета э.д.у. используются два метода.

В первом – сила рассматривается как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера. Если элементарный проводник dl с током i находится в магнитном поле с индукцией B , создаваемой другими проводниками (рис. 1), то сила dF , действующая на этот элемент, равна:

$$dF = i \cdot dl \cdot B = i \cdot B \cdot dl \cdot \sin \beta$$

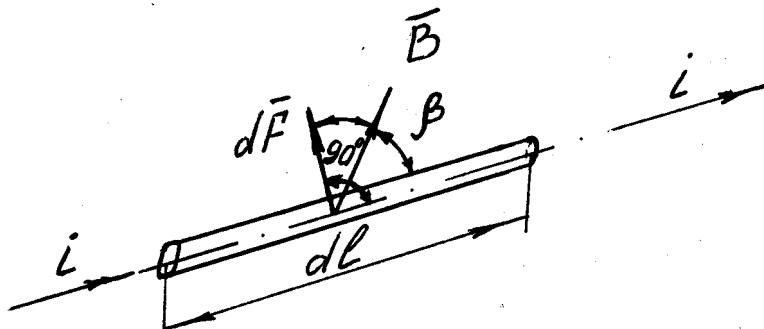


Рис. 20. Направление ЭДУ, действующего на элемент с током

где: i – ток; β – угол между векторами элемента dl и индукции B , измеряемый углом поворота вектора dl до вектора B по кратчайшему расстоянию.

За направление dl принимаем направление тока в элементе. Направление индукции B , создаваемой другим проводником, определяется по правилу Буравчика, а направление силы – по правилу левой руки.

Полная сила, действующая на проводник длиной l , определится по формуле

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l B \cdot i \cdot \sin \beta \cdot dl.$$

В случае любого расположения проводников в одной плоскости $\beta = 90^\circ$, то выражение имеет вид

$$F = \int_0^l B \cdot i \cdot dl.$$

Описанный метод рекомендуется применять тогда, когда можно аналитически найти индукцию в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

Второй метод основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током. Если пренебречь электростатической энергией системы и принять, что при деформации токоведущих контуров или при их перемещении под действием э.д.у. токи во всех контурах остаются неизменными, то силу можно найти по уравнению

$$F = \frac{\partial W}{\partial X},$$

где: W - электромагнитная энергия; X - возможное перемещение в направлении действия силы.

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

$$W = \frac{1}{2} L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot i_2^2 + M \cdot i_1 \cdot i_2,$$

где: L_1 и L_2 - индуктивности контуров; i_1 и i_2 - токи, протекающие в них; M - взаимная индуктивность.

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

Уравнение дает возможность рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силу взаимодействия контура со всеми остальными.

Для определения сил внутри одного независимого контура пользуемся уравнением

$$F = \frac{\partial W}{\partial X} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial X}$$

При расчете силы взаимодействия контуров мы считаем, что энергия изменяется только в результате изменения взаимного расположения контуров. При этом энергия, обусловленная собственной индуктивностью, считается неизменной. В данном случае, сила взаимодействия между контурами равна

$$F = \frac{\partial W}{\partial X} = i_1 \cdot i_2 \frac{\partial M}{\partial X}.$$

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

Направление действия ЭДУ. Найдем направление силы, действующей на элемент dl_1 с током i_1 , (рис.2).

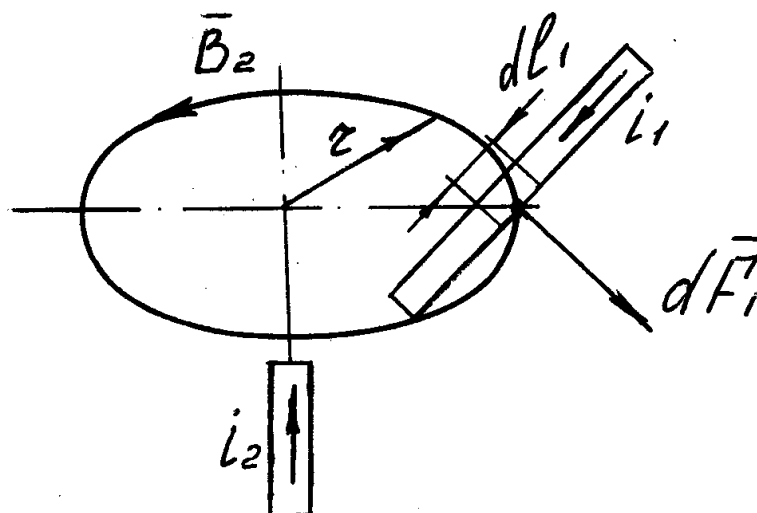


Рис. 21. Направление ЭДУ

Линия индукции B_r , создаваемая током i_{2r} , является окружностью с радиусом r , лежащей в плоскости, перпендикулярной i_2 . Направление силы dF определяется по правилу левой руки и показано на рис. 2.

Для плоской задачи, когда все проводники лежат в одной плоскости, результирующая на проводник, всегда перпендикулярна к этой плоскости, а сила лежит в плоскости. Направления э.д.у. для некоторых случаев расположения проводников в одной плоскости показаны на рис. 3.

Согласно положительному направлению силы соответствует возрастание энергии системы $\frac{\partial W}{\partial X}$, т. е. сила, действующая на токоведущие части, направлена так, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Для кольцевого контура

$$W = \frac{1}{2} l \cdot i^2 = \frac{1}{2} \Psi \cdot i = \frac{1}{2} \omega \cdot \phi \cdot i$$

где: ψ - потокосцепление; Φ - поток; ω - число витков в контуре.

В этом случае э.д.у. действует по радиусу, растягивая контур, т.к. при этом индуктивность, потокосцепление и поток возрастают.

В случае двух витков или катушек с разными направлениями токов сила F направлена так, чтобы отбросить витки друг от друга, т.к. потокосцепление увеличивается с ростом расстояния между ними. Минимальное потокосцепление будет иметь место при расстоянии между ними равном нулю. Если токи текут в одинаковом направлении, то витки притягиваются.

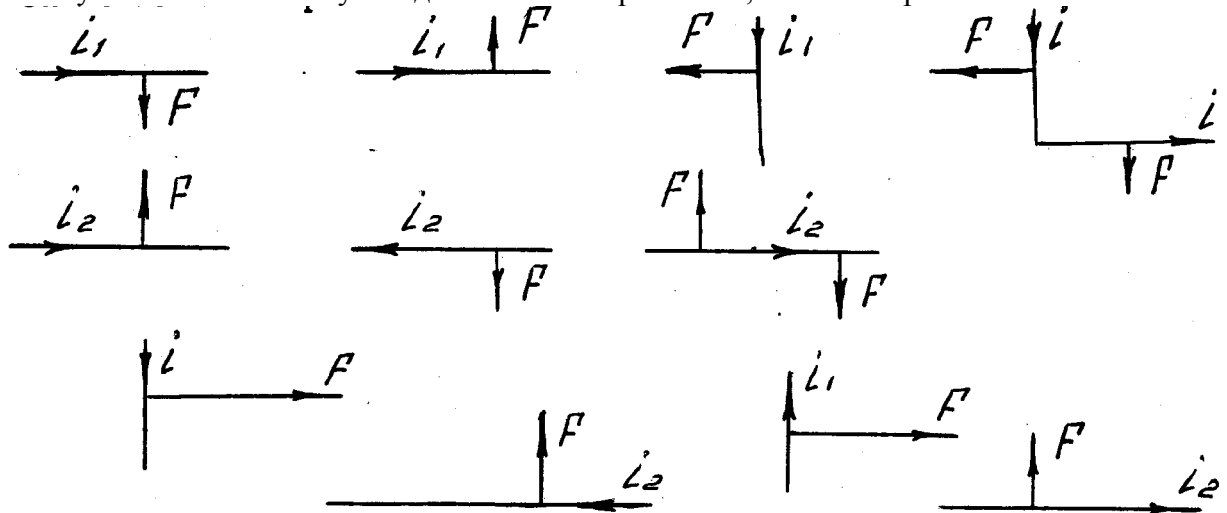


Рис. 22. Направление действия силы.

5.3 Усилия между параллельными проводниками

Сила взаимодействия между проводником l_1 и элементом dx , где x - координата на проводнике l_2 имеет выражение

$$F_x = \frac{10^{-7}}{a} i_1 \cdot i_2 \int_0^{l_2} \left(\frac{l-x}{(l-x)^2 + a^2} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right) dx,$$

где: l_1 - длина первого проводника; l_2 - длина второго проводника; i_1, i_2 - токи, протекающие по проводникам l_1 и l_2 ; a - расстояние между проводниками l_1 и l_2 .

Если $l_1 = l_2 = l$, то

$$F_x = 10^{-7} i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right).$$

Произведение

$$R_z = \frac{2l}{a} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right)$$

зависит только от размеров проводников и их расположения. Тогда

$$F_x = 10^{-7} i_1 \cdot i_2 \cdot R_z.$$

Если расстояние между проводниками значительно меньше их длины, т.е. $\frac{a}{l} \ll 1$, то

R_z можно принять равным $\frac{2l}{a}$. При $\frac{a}{l} \leq 0.1$ расчет ведется по формуле

$$F_x = 10^{-7} i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2l}{a}$$

Для двух параллельных проводников разной длины, расположенных с любым сдвигом,

$$R_z = \frac{\sum D - \sum S}{a} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a},$$

где: $\sum D$ - сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках;
 $\sum S$ - сумма боковых сторон этой трапеции.

Форма сечения проводника влияет на электродинамическую силу

$$F = 10^{-7} i_1 \cdot i_2 \cdot R_z \cdot R_\phi,$$

где R_ϕ - коэффициент формы.

5.4 Усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники

В электрических аппаратах очень часто встречается расположение частей токоведущего контура под прямым углом. Сила, действующая на перемычку, имеет в этом случае следующее выражение

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \cdot \ln \frac{a}{r} = 10^{-7} i^2 \cdot \ln \frac{a}{r},$$

где: μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость воздуха, равная $0,4 \cdot 10^{-6}$ Г/м; a - длина прямоугольной перемычки; r - радиус проводника.

В масляных выключателях и других аппаратах токоведущая цепь может иметь вид петли. На перемычку в этом случае действует э.д.у.

$$F = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dl} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + 0.25 \right) = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \cdot \left(\ln \frac{a}{r} + 0.25 \right).$$

Если длина l соизмерима с расстоянием a , то расчет э.д.у. необходимо производить по формуле

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \cdot \left(\ln \frac{2a}{2 \cdot \left(1 + \sqrt{\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 1} \right)} + 0.25 \right).$$

При расчете электродинамической стойкости необходимо определять момент э.д.у. относительно точки крепления

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

Кроме э.д.у. от левого и правого проводников создается изгибающий момент за счет силы, возникающей в месте перехода тока. Полный момент относительно точки O равен

$$\mu_0 = 10^{-7} i^2 \cdot \frac{a}{2} \cdot \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} + 0.25 \right).$$

5.5 Усилия в витке, катушке и между катушками

ЭДУ в витке. Сила, действующая в витке, направлена по радиусу; с ростом радиуса возрастет индуктивность, а следовательно, электромагнитная энергия проводника. Выражение имеет вид

$$F_R = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dR} = \frac{\mu_0}{2} i^2 \cdot \left(\ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right).$$

Сила F_R приложена к окружности длиной $2\pi R$. При расчете электродинамической стойкости необходимо знать силу F_g , разрывающую виток.

$$F_g = 10^{-7} i^2 \cdot \left(\ln \frac{8R}{r} - 0.75 \right).$$

Если круговой виток находится в равномерном магнитном поле, создаваемом другими проводниками, то кроме внутренних сил, возникает дополнительная сила в результате взаимодействия тока витка с внешним полем.

ЭДУ в катушке. Электродинамические силы в цилиндрической катушке направлены таким образом, чтобы возрастало ее потокоцепление. Поэтому при прохождении тока в обмотке возникают силы, стремящиеся сжать обмотку по высоте и толщине и увеличить диаметр. Для расчета сил, действующих в различных точках катушки, определяют индукцию в этих точках и используют рассмотренные выше уравнения.

ЭДУ между витками и между катушками. Сила, действующая между витками и катушками:

вертикальная составляющая:

$$F_h = \frac{dW}{dh} = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{dh} = \mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{R_1 h}{h^2 + C^2},$$

где R - радиус витка 1; h - расстояние между витками 1 и 2 ;

$$C = R_2 - R_1$$

горизонтальная составляющая:

$$F_{R_2} = \frac{dW}{dR_2} = \frac{1}{2} i_2 \cdot \frac{dL_2}{dR_2} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{dR_2}.$$

Для расчета сил, действующих между цилиндрическими катушками, удобно пользоваться энергетической формулой

$$F = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{dX} = i_1 \cdot i_2 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \psi.$$

6 УСИЛИЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

6.1 Усилия в месте изменения сечения проводника

При изменении сечения проводника линии тока искривляются, в результате сила F , действующая на линию тока, получает продольную F_2 и поперечную F_1 составляющие. Продольная сила направлена в сторону большего сечения

$$F_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = 10^{-7} i^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Электродинамическая сила, возникающая при изменении сечения, зависит только от отношения конечного и начального радиусов и не зависит от формы перехода при ассиметричном проводнике. Если положить, что площадка $\pi r_K^2 = \pi a^2$ находится в центре цилиндрических проводников, то сила, действующая на каждую половину проводника, определяется формулой (аналогично контактам цилиндрическим)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \cdot \ln \frac{r}{r_K} = 10^{-7} i^2 \cdot \ln \frac{r}{r_K}$$

где: r - радиус цилиндрического контакта; r_K - радиус круглой площадки касания; a - форма круга радиуса.

6.2 Усилия при наличии ферромагнитных частей

Сила определится для проводника с током вблизи ферромагнитной стенки, по формуле

$$F = \frac{dW}{dX} = \frac{1}{2} I \cdot \frac{d\phi}{dX}.$$

Сила, действующая на проводник (дугу), симметрично расположенный в пазу клиновидного сечения, равна

$$F_X = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot I^2 \cdot \frac{l \cdot h}{\delta_0(h-X)} = 2\pi \cdot 10^{-7} I^2 \frac{l \cdot h}{\delta_0(h-X)},$$

где: $\delta_X = \delta_0 \frac{h-X}{h}$ - зазор, соответствующий координате X .

6.3 Электродинамические усилия при переменном токе

Электродинамические усилия при переменном токе. Механический резонанс. Если токи в проводниках имеют одинаковое направление, то проводники притягиваются и сила равна

$$F = 10^{-7} R_Z \cdot I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t),$$

где: I_m - амплитудное значение тока; ω - угловая частота; F - максимальное значение силы, равное $10^{-7} R_Z \cdot I_m^2$.

Среднее значение силы за период

$$F_{cp} = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} F dt = \frac{F_m}{2} = 10^{-7} R_Z \cdot I^2,$$

где: I - действующее значение тока.

При наличии апериодической составляющей сила во времени меняется по уравнению

$$F = 10^{-7} R_Z \cdot I_m^2 \left(e^{\frac{t}{T_a}} - \cos \omega t \right)^2.$$

Наибольшее значение сила имеет через полпериода после начала короткого замыкания

$$F = 10^{-7} R_Z \cdot \kappa_{y0}^2 \cdot I_m^2 = 3.24 \cdot 10^{-7} R_Z \cdot I_m^2,$$

где: κ_{y0} - ударный коэффициент, зависит от постоянной времени $T_a = \frac{L}{R}$; L - индуктивность цепи; R - активное сопротивление цепи короткого замыкания.

Электродинамические силы в трехфазной цепи при отсутствии апериодической составляющей

$$F_{\max, \text{расч.}} = 0.81 C_1 \cdot I_m^2$$

где для однофазной цепи $C = 10^{-7} R_Z$, $C_1 = 10^{-7} \cdot \frac{2l}{a}$ (l - длина проводника; a - расстояние между осями).

Электродинамические силы в трехфазной системе при наличии апериодической составляющей тока:

максимальное отталкивающее усилие, действующее на провод фазы 1

$$F_{1omm, \max} = 0.805 C_1 \cdot (\kappa_{y0} \cdot I_m)^2$$

максимальная сила, действующая на провод средней фазы

$$F_{2\max} = 0.87 C_1 \cdot (\kappa_{y0} \cdot I_m)^2.$$

6.4 Электродинамическая стойкость электрических аппаратов

Электродинамическая стойкость аппаратов в однофазных установках определяется по ударному току короткого замыкания, а для 3-х фазного аппарата за расчетный ток берется

$$i_{y0} = \kappa_{y0} \cdot I_{mj},$$

где: I_{mj} - амплитуда периодической составляющей трехфазного короткого замыкания.

Расчет устойчивости проводится для средней фазы, дающей наибольшие значения сил.

6.5 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

$$f = \frac{\kappa}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{\nu g q}}$$

где: ν - плотность материала шины; g - ускорение свободного падения; l - пролет между изоляторами; E - модуль упругости материала шин; J - момент инерции сечения шины; q - сечение шины; κ - коэффициент, зависящий от характера крепления шин.

К шине как балке, закреплённой на концах, прикладываются максимальные расчётные усилия, находятся механические напряжения в ней и усилия, действующие на изоляторы. Максимальное механическое напряжение в шине, Па

$$\sigma_{\text{MAX}} = M / W = \frac{F_{\phi \text{ max}} l^2}{12W},$$

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

Нагрузка на изолятор

$$F_{\text{из}} = F_{\phi \text{ max}} l.$$

Прочность изолятора проверяется неравенством

$$F_{\text{из}} \leq 0,6 \cdot F_{\text{разр}} \cdot H / H',$$

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

7 НАГРЕВ И ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В АППАРАТАХ

7.1 Общие сведения

При работе аппарата в его токоведущей цепи, изоляции и деталях конструкции возникают потери электрической энергии, которые превращаются в тепло. Тепловая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично отдается в окружающую среду.

Работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

Нагрев токоведущих частей и изоляции аппарата в значительной степени определяет его надёжность. Поэтому во всех возможных режимах работы температура частей аппарата не должна превосходить таких значений, при которых обеспечивается его длительная надёжная работа.

7.2 Активные потери энергии в аппаратах

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

Энергия, выделяющаяся в проводнике

$$W = \int_0^t i^2 \cdot R \cdot dT,$$

где: W - энергия; i - ток в цепи; R – активное сопротивление; t - длительность протекания тока.

При переменном токе активное сопротивление проводника отличается от сопротивления при постоянном токе из-за возникновения поверхностного эффекта и эффекта близости. Сопротивление при переменном токе

$$R_{\approx} = R = \kappa_{\delta},$$

где: R - сопротивление при постоянном токе; κ_{δ} - коэффициент добавочных потерь, вызванных эффектом поверхностным и эффектом близости,

$$\kappa_{\delta} = \kappa_n \cdot \kappa_{\delta}$$

κ_n - коэффициент добавочных потерь от поверхностного эффекта рассчитывается по специальным кривым;

$$\kappa_{\delta} = \frac{R_{\approx}}{R_{\approx yed}};$$

κ_{δ} - коэффициент эффекта близости; R_{\approx} - активное сопротивление проводника, находящегося в магнитном поле других проводников; $R_{\approx yed}$ - сопротивление уединённого проводника.

Потери в нетоковедущих ферромагнитных частях. При переменном токе, кроме активных потерь в токоведущей цепи, появляются активные потери в ферромагнитных деталях аппаратов, расположенных в переменном магнитном поле.

В этих деталях появляются э.д.с. и вихревые токи таких направлений, при которых создаваемые ими потоки противодействуют изменению основного потока. Из-за размагничивающего действия этих потоков магнитный поток по сечению распределяется неравномерно. Толщина слоя, на протяжении которого индукция постоянна, называется глубиной проникновения потока. Эффект этот аналогичен поверхностному эффекту у проводников.

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_a}}$$

где: a - глубина проникновения; ρ - удельное сопротивление; ω - круговая частота; μ_a - абсолютная проницаемость материала.

От вихревых токов возникают дополнительные потери на перемагничивание за счет гистерезиса.

Полные потери в магнитопроводе

$$P_{CT} = (X_r \cdot B_m^{1,6} + X_B \cdot f \cdot B_m^2) f \cdot G_T$$

где: B_m - максимальное значение индукции; f - частота; X_r и X_B - коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов; G_T - масса магнитопровода.

В аппаратах переменного тока ВН, помимо потерь в проводниковых и ферромагнитных материалах, необходимо учитывать потери, возникающие в изоляции

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

где f - частота; C - емкость изоляции; U - действующее значение напряжения на изоляции; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

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

7.3 Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности

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

Теплопроводность – процесс распространения тепла между непосредственно соприкасающимися частицами, обусловленный тепловым движением молекул или атомов вещества, а в металлах свободных электронов.

Конвенция - процесс переноса тепла связанный с перемещением микрообъемов нагретого газа или жидкости (естественная и искусственная).

Лучеиспускание - процесс отдачи части тепла нагретого тела в окружающее пространство, путем излучения электромагнитных колебаний (ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей).

7.4. Установившийся режим нагрева

Процесс нагрева считается установившимся, если с течением времени температура аппарата и его частей не изменяется.

Расчёт сечения неизолированного проводника. Сопротивление круглого проводника

$$R = \frac{4\rho_0(1 + \alpha\theta_n) \cdot l}{\pi d^2}$$

где: ρ_0 - удельное сопротивление материала при 0°C ; d - диаметр проводника; l - его длина; α - температурный коэффициент сопротивления; θ - допустимая температура в номинальном режиме.

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I^2 \rho_a (1 + \alpha \cdot \theta_H)}{\pi^2 \cdot K_T (\theta_H - \theta_O)}},$$

где K_T - удельный обобщенный коэффициент теплоотдачи.

Выбирая диаметр с некоторым запасом, рассчитываем коэффициент добавочных потерь K_ϕ и окончательную проверку

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I^2 \rho_a (1 + \alpha \cdot \theta_H) K_\delta}{\pi^2 \cdot K_T (\theta_H - \theta_O)}}$$

для проводников прямоугольного сечения (шин)

$$R = \rho_a \frac{1 + \alpha \cdot \theta_H}{a \cdot b} l$$

где a и b - стороны сечения.

Из конструктивных соображений и из условий механической прочности задаются соотношением $m = \frac{a}{b}$ (в пределах 3 – 10) и

$$b = \sqrt[3]{\frac{4I^2 \rho_a (1 + \alpha \cdot \theta_H) K_\delta}{m(m+1) \cdot 2K_T (\theta_H - \theta_O)}}$$

Определив затем a , находят K_δ и проводят проверку с учетом этого коэффициента.

Нагрев изолированных токоведущих частей. Результирующее тепловое сопротивление

$$R_{Tpe} = \frac{\theta_{пров} - \theta_a}{\phi} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot l} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{K_T \cdot \pi \cdot D \cdot l} = R_T + R_{Ta}$$

где: $\theta_{пров}$ - температура поверхности проводника; θ_a - температура окружающей среды; ϕ - тепловой поток в единицу времени через боковую поверхность; R_T - тепловое сопротивление изоляции; R_{Ta} - тепловое сопротивление перехода от наружной стенки к окружающей среде; D - диаметр изоляции; λ - удельная теплопроводность изоляционного материала.

Нагрев катушек.

$$R_{T.pez} = \frac{\theta_m}{\phi},$$

где θ_m - превышение температуры (max. значение).

$$\theta_m = \frac{P_0 \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2)}{R_{T2} \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot h} + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{P_0}{4\lambda} (r_2^2 - r_1^2),$$

где: P_0 - мощность потерь в единице объема катушки; r_1 - внутренний радиус катушки; r_2 - внешний радиус катушки; h - высота катушки; R_{T2} - средний радиус.

Максимальная температура провода

$$\theta_{np} = \theta_m + \theta_a$$

7.5 Нагрев аппаратов в переходных режимах

Процесс нагрева и охлаждения аппаратов описывается уравнениями энергетического баланса.

Различают кратковременный режим работы, перемежающийся и повторно-кратковременный.

Нагрев при кратковременном режиме работы. Кратковременный - режим работы аппарата, когда при включении температура его не достигает установившейся.

Время

$$t_{kp} = T \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{\tau_{дон}}{\tau_{кр}}},$$

где: T - время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при

условии отсутствия отдачи тепла в окружающую среду; τ_{don} - допустимое значение температуры токоведущих частей; $\tau_{\text{кр}}$ - установившееся значение превышения температуры при $I_{\text{кр}}$ токе допустимом кратковременного режима

$$\tau_{\text{don}} = \frac{I_{\text{don}}^2 \cdot R}{K_T \cdot S}; \tau_{\text{кр}} = \frac{I_{\text{кр}}^2 \cdot R}{K_T \cdot S}; I_{\text{дл}}^2 = I_{\text{кр}}^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{кр}}}{\tau}} \right)$$

Для характеристики кратковременного режима вводится понятие коэффициента перегрузки

$$p = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{дл}}}.$$

Перебегающий и повторно-кратковременный режимы работы. Наиболее общим является перебегающий режим, когда после кратковременного нагрева аппарата величина тока падает и температура его снижается.

По прошествии некоторого времени максимальные превышения температуры τ_{max} и минимальные превышения τ_{min} соседних циклов станут одинаковыми.

$$\tau_{\text{max}} = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}} \right) + \tau_{\text{min}} \cdot e^{-\frac{t_{p1}}{T}},$$

где t_{p1} - время первого цикла установившегося тока I_{p1}

$$I_{\text{дл}} = \frac{\frac{I_{p1}^2 \cdot R}{R_T \cdot S} \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T}} \right) + I_{p2}^2 \left(e^{-\frac{t_{p1}}{T}} - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}} \right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1} + t_{p2}}{T}}}$$

Частным случаем перебегающего режима является повторно-кратковременный режим, при котором $I_{p2} = 0$, $I_{p1} = I_P$

$$I_{\text{дл}} = I_P \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_P}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_P + t_{\text{II}}}{T}}}}$$

Для характеристики повторно-кратковременного режима вводится понятие - продолжительность включения ПВ или ПВ%:

$$\text{ПВ}\% = \text{ПВ} \cdot 100\% = \frac{t_P}{t_P + t_{\text{II}}} \cdot 100\% = \frac{t_P}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\%$$

где $t_P + t_{\text{II}}$ - время цикла $t_{\text{ц}}$.

С учетом коэффициента перегрузки по току

$$p = \frac{I_P}{I_{\text{дл}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_P \cdot 100\%}{T \cdot \text{ПВ}\%}}}{1 - e^{-\frac{t_P}{T}}}}.$$

7.6 Нагрев аппаратов при коротком замыкании

При расчете температуры элементов аппаратов в режиме короткого замыкания благодаря малой длительности этого режима можно пренебречь теплом, отдаваемым во внешнюю среду, и считать, что все тепло расходуется на повышение температуры проводника. В этом случае энергетический баланс проводника, имеющего сопротивление R и массу M , выражается уравнением

$$I^2 \cdot R \cdot d \cdot t = c \cdot M \cdot d\theta$$

Ввиду того, что температура может достигать больших значений (300°C), необходимо учитывать изменение как сопротивления R , так и удельной теплоемкости C от температуры. Изменение сопротивления проводника от температуры

$$R = K_0 \cdot \rho_0 \cdot \frac{l}{q} (1 + \alpha \cdot \theta),$$

где: K_0 - коэффициент добавочных потерь; ρ_0 - удельная теплоемкость при 0°C ; α - температурный коэффициент сопротивления материала; q - сечение проводника; l - длина проводника.

Зависимость удельной теплоемкости от температуры

$$C = C_0 (1 + \beta \cdot \theta),$$

где: C_0 - удельная теплоемкость при 0°C ; β - температурный коэффициент теплоемкости.

Выразив

$$M = \gamma \cdot l \cdot g$$

и подставив в эти выражения после упрощения имеем

$$\frac{I^2}{q^2} dt = \frac{C_0 \cdot \gamma (1 + \beta \cdot \theta)}{R_0 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \cdot \theta)} d\theta$$

В результате интегрирования получим

$$\frac{I^2}{q^2} t_{\kappa.з.} = \delta^2 t_{\kappa.з.} = A_{\theta\kappa.з.} - A_{\theta H}$$

где: δ - плотность тока;

$A_{\theta\kappa.з.}$ и $A_{\theta H}$ - значения интеграла правой части при верхнем ($\theta_{\kappa.з.}$) и нижнем (θ_H) пределах интегрирования.

С целью упрощения расчетов построены кривые $\theta = f(A_0)$ для различных материалов. С помощью этих кривых легко произвести расчет на термическую стойкость аппарата. В соответствии со свойствами проводника и изоляции выбирается допустимая температура при коротком замыкании $\theta_{\kappa.з.}$, и при номинальном токе θ_H . С помощью кривых находим $A_{\theta\kappa.з.}$ и $A_{\theta H}$, соответствующие температурам $\theta_{\kappa.з.}$ и θ_H . Зная $\delta^2 t$ можно при данных t и I определить сечение проводника q , либо при известных t и q найти допустимый ток короткого замыкания. Если известен допустимый ток I_1 при времени $t_{\kappa.з.1}$, то допустимый ток при времени $t_{\kappa.з.2}$

$$I_2 = I_1 \cdot \sqrt{\frac{t_{\kappa.з.1}}{t_{\kappa.з.2}}}$$

Уравнение не учитывает теплоотдачу в окружающую среду, поэтому им можно пользоваться при времени не более 10 с.

Если используется материал, для которого нет кривых, аналогичных, то при $\beta \ll \alpha$ расчет термической устойчивости производят по формуле

$$\delta^2 t = \frac{C_0 \cdot \gamma}{\alpha \cdot \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha \cdot \theta_{\kappa.з.}}{1 + \alpha \cdot \theta_H}$$

При коротком замыкании вблизи генератора из-за переходных процессов величина переменной составляющей тока, протекающего через аппарат, меняется. В этом случае расчет термической стойкости ведется по установившемуся току короткого замыкания I_∞

Время прохождения установившегося тока I_{∞} принимается равным фиктивному времени t_{ϕ} .

Фиктивное время t_{ϕ} - это время, при котором тепло, выделяющееся при прохождении установившегося тока I_{∞} равно теплу, выделяющемуся при прохождении реального тока за реальное время протекания.

Фиктивное время для периодической составляющей тока короткого замыкания $t_{\phi, пер.}$ находится с помощью кривых. Для данного генератора определяют $\beta'' = \frac{I''}{I_{\infty}}$ (I'' - действующее значение сверхпереходного тока) и зная действительное время прохождения тока $t_{к.з.} = t$ и β , находят $t_{\phi, пер.}$.

Фиктивное время для апериодической составляющей тока может быть определено

$$t_{\phi, апер.} = 0.005(\beta'')^2$$

Фиктивное время

$$t_{\phi} = t_{\phi, пер.} + t_{\phi, апер.}$$

7.7 Допустимая температура различных частей электрических аппаратов

Предельные температуры элементов аппаратов определяются свойствами применённых проводниковых и изоляционных материалов, длительностью воздействия и назначением аппарата.

Температура элементов аппарата в длительном режиме складывается из температуры окружающей среды θ_0 и превышения температуры:

$$\theta = \theta_0 + I$$

Согласно ГОСТ наибольшая температура окружающей среда принята +40°C.

Если $\theta_0 > 40^\circ\text{C}$, то токовая нагрузка аппарата должна быть снижена таким образом, чтобы предельные температуры находились в соответствии с ГОСТ (уменьшается допустимое превышение температуры). Допустимый ток при $\theta_0 \neq 40^\circ\text{C}$ определяется формулой

$$I_{\text{дон}} = I_H \sqrt{\frac{\theta_{\text{дон}} - \theta_0}{\theta_{\text{дон}} - 40^\circ\text{C}}}.$$

Если $\theta_0 < 40^\circ\text{C}$, то токовая нагрузка аппарата может быть увеличена, но не более чем на 20% с таким расчетом, чтобы предельные температуры были в соответствии с ГОСТ.

Шины, присоединяемые к аппаратным зажимам, должны иметь температуру ниже, чем эти зажимы, для того, чтобы создавать отвод тепла от контактов.

7.8 Термическая стойкость электрических аппаратов

Токоведущие части, рассчитанные и выбранные по длительному режиму, должны быть проверены на термическую стойкость при коротком замыкании с помощью рассмотренных зависимостей и кривых. При расчете берется наиболее тяжелый случай - к моменту начала короткого замыкания элемент аппарата нагрет длительным током до предельно допустимой температуры этого режима.

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

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

8 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

8.1 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.

8.2 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 здесь не рассматривается.

Контакторы различаются по роду тока: *постоянного, переменного* (частотой 50 и 60 Гц) , а также переменного тока повышенной частоты (до 10 кГц) . Они могут выполняться с управлением на постоянном или переменном току частотой 50 и 60 Гц независимо от рода 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. Контакторы в основном выполняются по 10-му классу и на соответствующую механическую износостойкость

8.3 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-ый класс) и соответствующей механической износостойкостью (10 - 15 и .1 - 5 млн. циклов).

8.4 Узлы контактора и принцип его действия; физические явления, происходящие в электрическом аппарате

Контактор (рис. 23) имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, электромагнит и систему вспомогательных контактов.

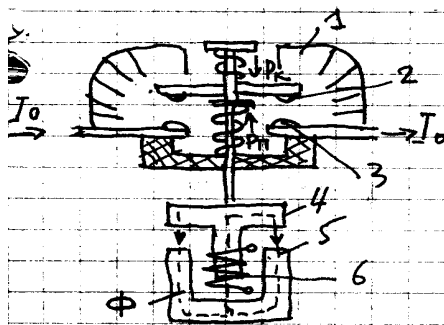


Рис. 23. Прямоходовой контактор

Главные контакты осуществляют и размыкание силовой цепи.

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

Электромагнитная система обеспечивает дистанционное управление контактором, т.е. 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. (рис. 23) изображена конструктивная схема контактора прямоходового типа. При подаче напряжения на обмотку 6 электромагнитного привода возникает магнитный поток Φ , который развивает электромагнитную силу и притягивает к полюсам 5 верхний якорь 4. Вместе с ним переместится вниз контактный элемент 2, мостиковые контакты 2 и 3 замкнут цепь тока I_0 . Контактная пружина обеспечит необходимую силу нажатия P_k в замкнутых контактах. Для отключения аппарата снимается напряжение с обмотки 6. Тогда исчезнет электромагнитная сила привода и силой P_n отключающей пружины подвижная система переместится вверх, а цепь ток I_0 будет разорвана контактами 2 и 3. Возникающие при отключении тока электрические дуги между контактами 2 и 3 гасятся в дугогасительном устройстве 1.

8.5 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_B и отключения t_0 .

$I_{ном}$ контактора - это ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течении 8 часов 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 к.з. 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 - отключения контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при этом равен нулю. Механическая износостойкость современных контакторов составляет $(10 - 20)10^6$ операций.

Коммутационную износостойкость определяется числом включений и отключений цепи

с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость $(2 - 3)10^6$ 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, в контакторах с $I_{НОМ} = 630$ А, $t_0 = 0,33$ с.

9 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕРИИ КОНТАКТОРОВ

9.1 Контактная система

Контактная система. Выпускаются на $I_{\text{ном}}$ от 100 до 1000 А при числе главных контактов от одного до пяти. Наиболее распространены контакторы трехполюсного исполнения. Контактors имеют вспомогательные контакты, которые приводятся в действие тем же электромагнитом, что и главные контакты.

9.2 Электромагнитные системы: физические явления, происходящие в электрических аппаратах

а) **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 К.З. витком. Катушки низкоомные, с малым числом витков. Электромагнитная система независимо от типа состоит из сердечника, якоря, К.З. витка, катушки и крепежных деталей.

б) **Дугогасительные системы.** Для контакторов с однофазным разрывом на фазу на $U = 380$ В и частоту до 600 вкл/ч применяется магнитное гашение в камерах с широкими щелями. Для контакторов тяжелого режима работы 1200 вкл/ч и более на $U = 660$ В широкое распространение получило электромагнитное гашение в камерах с узкими щелями, а так же 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.

9.3 Конструкция контакторов переменного тока

Кинематические схемы. Кинематические схемы современных контакторов переменного тока характеризуются большим разнообразием.

Поворотные схемы применяются преимущественно в контакторах тяжелого режима работы и специальных, 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.3.1, а). В ней исключаются промежуточные звенья и шарнирные соединения от якоря к контактам. Иногда контакты непосредственно связываются с якорем (рис.3.1,б). Якорь перемещается в направляющих, где трущейся парой является 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 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 их расчетом и конструкцией, отсутствием ударов в них, 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. 24, 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. 24, в) или поворотные (рис. 24, д) контактные и магнитные системы приводят к снижению степени взаимного влияния ударов в каждой из систем. Кинематическая схема на рис. 24, е позволяет обеспечить при одинаковой по отношению к схемам на рис. 24, а и б магнитной системе более высокое контактное нажатие. Однако в схеме на рис. 24, е следует ожидать более сильных ударов, для устранения вредного влияния которых необходимо применять специальные меры.

Для нормальных условий работы (в основном категория АС-3) контакторы выполняются по кинематическим схемам, изображенным на рис. 24.

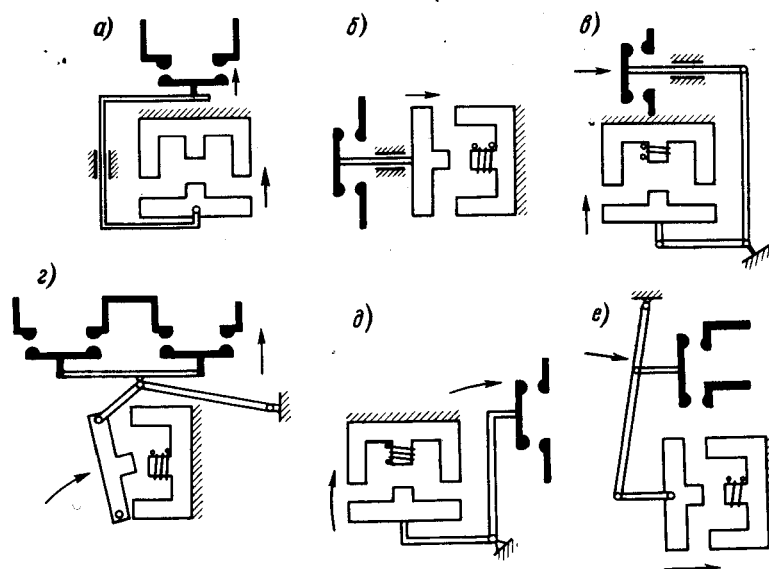


Рис. 24. Характерные кинематические схемы контакторов переменного тока нормального режима работы: а,б,в - прямоходовая схема; г,д,е - поворотная схема магнитной системы.

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.

9.4 Контактторы серии КТ6600

Контактторы 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 10×10^6 циклов, коммутационная износостойкость 10^6 циклов.

9.5 Контактторы серии КТ64 и КТ65

Контактторы 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 $(5...15)10^6$ циклов, в зависимости от значения $I_{НОМ}$, коммутационная износостойкость (КИ) $5-10^6$ циклов, а при коммутации $I_{НОМ}$ $15-10^6$ циклов.

Конструкция контакторов моноблочная с поворотной подвижной системой.

9.6 Контактторы серии МК

Контактторы 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. Контактторы 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_N до 63А 16×10^6 , с I_N 100 А и 160А – 10×10^6 циклов. Допустимая частота срабатывания 1200 вкл/ч при ПВ=40%.

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

9.7 Контактторы переменного тока на напряжение 1140 В

Электрическая схема контактора с бездуговой коммутацией приведена на рис. 25. 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, связаны жестко с приводом.

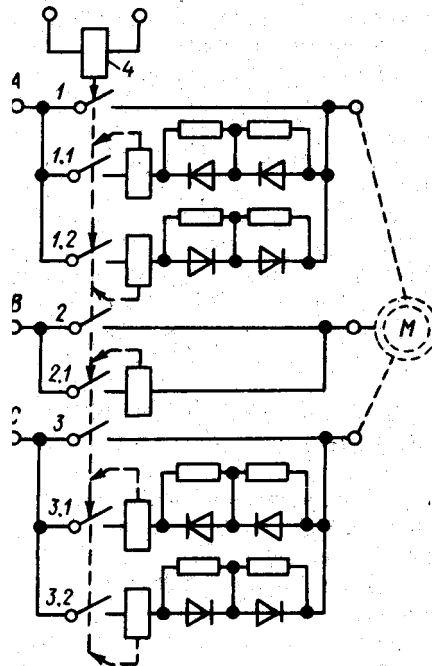


Рис.25. Принципиальная электрическая схема контактора с синхронизированным отключением

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.

9.8 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 ток 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_H 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 КТ 12Р37 с I_H 160 А и 400 А и U_H 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.

9.9 Выбор, применение и эксплуатация контакторов

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

Для К серии КПВ допустимый ток повторно кратковременного режима $I_{доп}$ с учетом нагрева контактов можно определить по формуле

$$I_{доп} = \frac{I_{НОМ}}{\sqrt{\frac{ПВ\%}{100} - \frac{n}{600}} \sqrt{\frac{ПВ\%}{100}}},$$

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

В ряде случаев заводом-изготовителем указываются допустимые коммутируемые токи К

при различных режимах работы и различном напряжении коммутируемой цепи.

Колебания напряжения на катушке К 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 40А 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, 40А (главные контакторы), один замыкающий контакт; вспомогательные контакты: два замыкающих и два размыкающих; катушка 24 В. Исполнение УЗ.

10 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОНТАКТОРЫ ПОТОЯННОГО ТОКА

10.1 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 $0,1U_{\text{НОМ}}$.

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 $10I_{\text{НОМ}}$]. Такие режимы возникают довольно редко (например, при КЗ).

10.2 Контактторы постоянного тока, их конструкция и основные параметры

Контактторы 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.

10.3 Контактторы серии КПВ-600

Имеют 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.

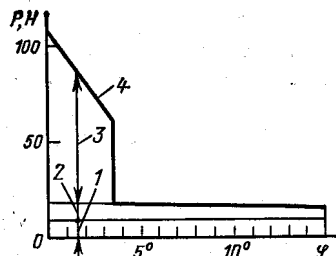


Рис.26. Характеристика противодействующих усилий контактора КТВ-600

Характеристика противодействующих усилий, приведенных к якорю электромагнита, для контактора КТВ-600 приведена на рис. 3.2.1, 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.

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.

10.4 Контактторы типа КТВ-600

Применяются для реверса а. двигателей при большой частоте включений в час (до 1200). В этих контакторах сдвоенные 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 а. двигателей.

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

10.5 Контактторы типа КМВ. Контактторы серии КТ81

а) **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, т.к. в отключенную цепь вводятся два дуговых промежутка.

б) **Контакторы серии КТ81.** Рассчитаны на токи до 630 А и напряжение 220 В. Применено бездуговое гашение с использованием тириستоров и силовых диодов. Контактторы 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. Контактторы 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).

10.6 Выбор электрических аппаратов

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

11 ПУСКАТЕЛИ МАГНИТНЫЕ

11.1 Назначение магнитных пускателей

Магнитным пускателем называется ЭА, предназначенный для пуска и отключения КЗ асинхронных двигателей.

11.2 Основные требования и условия работы; физические явления, происходящие в электрических аппаратах

Работа асинхронных двигателей в значительной степени зависит от таких свойств, как износостойкость, коммутационная способность, надежность защиты двигателя от перегрузок. В процессе эксплуатации довольно часто обрывается одна из фаз трехфазного питающего напряжения, например, из-за перегорания предохранителя. К двигателю при этом подводится только две фазы и ток в статоре резко возрастает, что приводит к выходу его из строя из-за нагрева обмотки до высокой температуры. Тепловые реле пускателя от этих токов должны срабатывать и отключать двигатель.

При включении двигателя пусковой ток в 6 раз превышает номинальный. При таком токе даже незначительная вибрация контактов быстро выводит их из строя. Это накладывает высокие требования в отношении вибрации и износа контактов. С целью уменьшения времени вибрации контакты и подвижные части контакторов МП делаются возможно легче, уменьшается их скорость, увеличивается контактное нажатие.

После разгона двигателя ток падает до номинального значения. Поэтому отключение работающего двигателя происходит при меньшей токовой нагрузке контактов.

Нередки случаи, когда двигатель необходимо отключить сразу после пуска. В этих случаях контактор пускателя отключает ток, равный 6 - ному номинальному при низком коэффициенте мощности ($\cos \varphi \leq 0,3$) и восстанавливаемом напряжении, равном номинальному напряжению сети. По действующим нормам после 50 - кратного включения и выключения заторможенного двигателя пускатель должен быть пригоден для дальнейшей работы.

Электрическая износостойкость контакторов пускателя обратно пропорциональна мощности управляемого двигателя в степени 1,5 - 2. Для повышения срока службы пускателя его необходимо выбирать на ток, превышающий номинальный ток двигателя.

Двигатель меньшей мощности быстрее достигает номинальной частоты вращения. Поэтому при его отключении разрывается установившийся номинальный ток, что облегчает работу пускателя и повышает допустимой число включений в час.

С учетом широкого распространения магнитных пускателей большое значение приобретает снижение потребляемой ими мощности, которая расходуется в электромагните контактора и других элементах схемы (тепловые реле и т.д.). Потери мощности в электромагните составляют примерно 60, в тепловых реле 40% общих потерь пускателя.

11.3 Конструкция и схема включения

Магнитные пускатели. Магнитный пускатель на номинальный ток 10 А (рис. 3.1, а) имеет мостиковую контактную систему (позиции 3, 9, 11) с металлокерамическими контактами 4, расположенными в ДУ 1. Контактное нажатие создается пружиной 14, упирающейся в траверсу 2. На контакты воздействует электромагнит 10 с Ш-образным магнитопроводом и

короткозамкнутым витком 13, расположенным на неподвижной части магнитопровода 6.

Возвратная пружина 7 расположена внутри электромагнита. На его среднем стержне размещена катушка 8. При $I_{ном} > 10$ А ДУ выполняется в виде дугогасительной решетки на каждом разрыве. В системе вспомогательных контактов можно установить до четырех дополнительных контактов 5 (рис. 3.1,б). Детали пускателя прикреплены на основании 11.

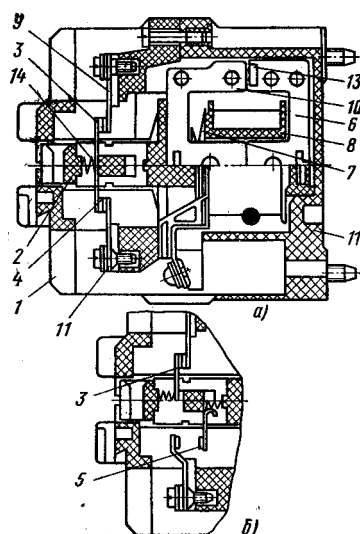


Рис. 27. Магнитный пускатель серии ПМЛ

Тиристорные пускатели. Бесконтактные тиристорные пускатели находят широкое применение во взрыво- и пожароопасных производствах и других областях техники, требующих высокой надежности.

Силовой блок пускателя содержит силовые тиристоры и диоды, рассчитанные на номинальный и пусковой токи двигателя (рис. 27). При подаче сигнала управления на электроды тиристоры открываются и двигатель подключается к сети. В отрицательный полупериод, когда тиристоры закрываются отрицательным анодным напряжением, ток двигателя проходит по диодам. Диоды могут быть заменены тиристорами.

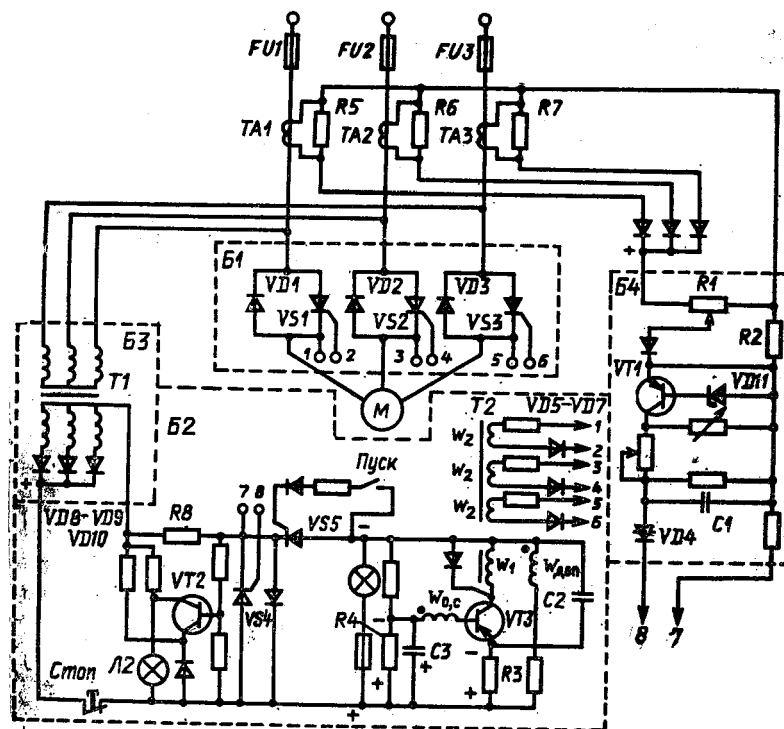


Рис.28. Тиристорный пускатель

При снятии сигнала управления (при перегрузке, потере фазы, нажатии кнопки "Стоп")

тиристоры закрываются. Следующий период тока пропускается диодами. После этого диоды закрываются и двигатель отключается от сети. Защита двигателя и силовых тириستоров от токов КЗ в данном пускателе осуществляется быстродействующими предохранителями типа ПНБ-5.

По сравнению с контактными тиристорный пускатель обладает следующими преимуществами:

1. Отсутствие электрической дуги при коммутациях делает аппарат незаменимым в во взрывоопасных и пожароопасных средах.
2. Высокая электрическая износостойкость ($15 \cdot 10^6$ циклов)
3. Совершенная защита от токов перегрузки и КЗ, а также при потере фазы, что обеспечивает увеличение срока службы двигателя.
4. Допустимое число включений достигает 2000 в час.
5. Длительность отключения не превышает 0,02с.
6. Высокая надежность и долговечность, а также отсутствие необходимости в уходе при эксплуатации.

Недостатками тиристорного пускателя является сложность схемы, большие габариты и высокая стоимость.

11.4 Магнитные пускатели серии ПМЛ

МП серии ПМЛ. Работают в сети переменного тока напряжением 600 В при I_H от 10 до 200 А. Коммутационная износостойкость пускателя на 200 А составляет $2 \cdot 10^6$ при 600 вкл/ч и том же U_H для категории применения АС-4. При U 660 В износостойкость та же при 300 вкл/ч.

При $I_{НОМ} < 10$ А износостойкость при $I_P < I_{НОМ}$ $N_P = N_{НОМ}$. При $I_{НОМ} > 10$ А

$$N_P = N_{НОМ} (I_{НОМ} / I_P)^2,$$

где $N_{НОМ}$ - износостойкость при номинальном токе $I_{НОМ}$.

МП имеет мостиковую контактную систему с металлокерамическими контактами, расположенными в ДУ. При $I_{НОМ} > 10$ А ДУ выполняется в виде дугогасительной решетки на каждом разрыве. В корпусе пускателя устанавливается тепловое трехфазной реле типа РТЛ, позволяющее регулировать ток срабатывания.

11.5 Пускатели серии ПМА

Пускатели серии ПМА. На токи 40 - 160 А, U 380- 660 В. Электромагнит в пускателях может быть как переменного так и постоянного тока. Частота включений достигает 1200 вкл/ч. Коммутационная износостойкость составляет от 0,5 до 2, $5 \cdot 10^6$ циклов в зависимости от условий работы.

11.6 Нереверсивные пускатели

Магнитный пускатель (МП) относительно простое комплектное устройство, содержащее один (нереверсивный пускатель) или два (реверсивный пускатель) контактора, кнопки управления («Пуск», «Стоп»), электротепловые реле. Контакторами производится коммутация силовой цепи. Тепловые реле осуществляют защиту от перегрузок и "потери фазы". Аппараты устанавливаются на плите или раме (открытое исполнение) или размещаются в ящике (закрытое исполнение).

В пускателях используются контакторы категории применения АС-2 и АС-3. В технических данных указывается не только номинальный ток пускателя, но и мощность электродвигателя, с которым он может работать при разных напряжениях.

11.7 Схема включения нереверсивного пускателя

В схеме пускателя, приведенной на рис. 29, в двух фазах двигателя M включены нагревательные элементы тепловых реле $KK1$, $KK2$. Тепловые реле защищают двигатель от перегрузки, а предохранители $FU1—FU3$ защищают питающую сеть от КЗ в двигателе.

Главные контакты $KM1—KM3$ пускателя включены последовательно с предохранителями $FU1—FU3$. Катушка KM контактора подключается к сети через контакты тепловых реле и кнопки управления «Пуск» и «Стоп». При нажатии кнопки «Пуск» (SB2) напряжение на катушку KM подается через замкнутые контакты кнопки «Стоп» и замкнутые контакты тепловых реле. При срабатывании контактора замыкаются вспомогательные контакты KM , шунтирующие замыкающие контакты кнопки «Пуск», которую после этого можно отпустить. Для отключения двигателя нажимается кнопка «Стоп» (SB1), после чего контакты $KM1—KM3$ размыкаются. При токовой перегрузке двигателя срабатывают $KK1$, $KK2$, контакты которых разрывают цепь катушки KM . При этом контакты $KM1—KM3$ размыкаются и двигатель отключается.

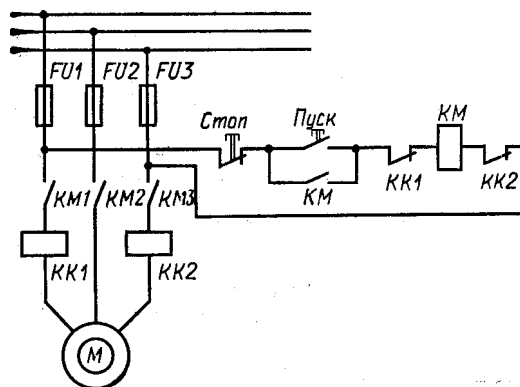


Рис. 29. Схема включения нереверсивного пускателя

Высокий коэффициент возврата электромагнитов контакторов \sim тока позволяет защищать двигатель от понижения напряжения сети [электромагнит отпускает при $U = (0,6-0,7)U_{ном}$]. При восстановлении напряжения сети до номинального значения самопроизвольного включения пускателя не происходит, т.к. после размыкания контакта $KM4$ цепь катушки KM не замкнута.

11.8 Реверсивный магнитный пускатель

Реверсивный пускатель. Такой пускатель помимо пуска и защиты двигателя обеспечивает его реверс с помощью изменения последовательности фаз. Пускатель содержит два контактора, якоря которых соединены между собой рычагом механической блокировки. Для того чтобы катушка контактора не вышла из строя, механическая блокировка дополняется электрической.

11.9 Схема включения реверсивного пускателя

Реверсивное управление асинхронным электродвигателем с КЗ ротором, осуществляется контакторами $KM1$ и $KM2$ реверсивного МП показано на рис. 30, а, б.

Цепи 1 управления и цепи 2-4 сигнальных ламп HLR, HLR и HLG питаются от той же сети, что и электродвигатель M . В цепи 1 общими для участков катушки $KM1$ 1-го контактора и $KM2$ 2-го контактора является кнопка отключения STB и контакт электротеплового реле KK .

В исходном положении горит лампа HLG, указывая на отключенное состояние обоих контакторов (ее цепь замкнута через их размыкающие контакты $KM1:3$ и $KM2:4$) и электродвигателя M .

Для включения электродвигателя M с вращением в одну сторону нажимают кнопку

SBC1 и ее контакт 3BC1:1 в цепи катушки контактора KM1 замыкается, а контакт SBC1:2 в цепи катушки контактора KM2 размыкается. При этом замыкается цепь включения контактора KM1, который срабатывает, включая двигатель М. При срабатывании контактора KM1 замыкается его вспомогательный контакт KM1:1, шунтируя контакт SBC1, в результате чего при отпускании этой кнопки контактор KM1 и двигатель М остаются во включенном состоянии.

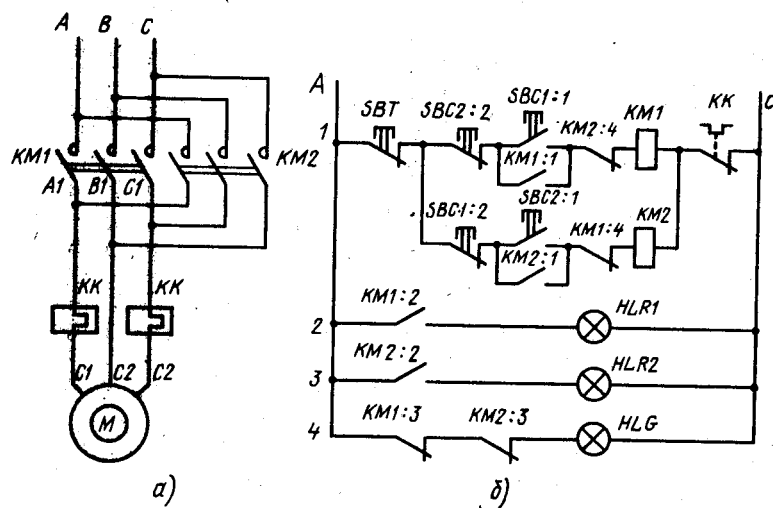


Рис. 30. Принципиальная схема управления асинхронным двигателем:
а - силовые цепи; б - цепи управления

Для включения электродвигателя М с вращением в другую сторону нажимают кнопку SBC2, и ее контакт SBC2:1 в цепи катушки контактора KM2 замыкается, а контакт SBC2:2 в цепи катушки контактора KM1 размыкается. Контактор KM2 при этом срабатывает, электродвигатель включается и начинает вращаться, но в другую сторону, поскольку чередование фаз подводимых к обмотке, изменяется: к выводам C1, C2 и C3 подводятся соответственно фазы А, С, В электрической сети (в первом случае подводились фазы А, В, С)

Для отключения электродвигателя нажимают кнопку SBT, разрывая тем самым цепь 1, в которую включены обмотки обоих контакторов.

При перегрузке двигатель отключается реле КК, контакт которого входит в цепь 1. При срабатывании контактора KM1 его вспомогательные контакты KM1:2 замыкаются, а KM1:3 размыкаются, лампа HLG, сигнализирующая об отключенном состоянии двигателя М, гаснет, лампа LHR1 загорается, указывая что он включен и вращается например "вперед". При срабатывании контактора KM2, его вспомогательный контакт KM2:2 замыкается, а KM2:3 размыкается, лампа HLG гаснет, а лампа HLR2 загорается, указывая, что он включен и вращается в обратном направлении ("назад").

Введение в цепь включения контактора KM1 размыкающего контакта SBC2:2 кнопки включения контактора KM2 и его вспомогательного контакта KM2:4, а в цепь включения контактора KM2 размыкающего контакта SBC1:2 кнопки включения контактора KM1 обеспечивает электрическую блокировку. Такая блокировка предотвращает одновременное включение обоих контакторов или включения одного из них при включенном состоянии другого, что может привести к КЗ между фазами В и С сети.

11.10 Выбор магнитных пускателей

Пускатель необходимо выбирать на ток, превышающий номинальный ток двигателя.

Важнейшей характеристикой пускателей, как и контакторов, являются коммутации нагрузки. Характеристики режимов коммутации пускателей нагрузки следует использовать при их выборе.

При заказе пускателя следует указать его тип, напряжение и ток цепи главных контакторов, число и исполнение вспомогательных контактов, напряжение катушки,

климатическое исполнение и категорию размещения .

Согласование тепловых реле и двигателя производится выбором номинального тока $I_{\text{ном. НАГР}}$ нагревателя на ток, равный номинальному току двигателя:

$$I_{\text{ном. НАГР.}} = I_{\text{ном.дв}}$$

Применение тепловых реле целесообразно при длительности включения двигателя, превышающей 30 мин.

Тепловые реле в большинстве случаев не защищают цепь от КЗ и требуют для своей защиты установки предохранителей или защиты с помощью электромагнитных реле или автоматов.

12 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

12.1 Назначение и область применения реле

Под реле понимают такой ЭА, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной наперед заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра. Хотя бы один из этих параметров должен быть электрическим.

Электромагнитные реле благодаря простоте конструкции и надёжности широко распространены в схемах автоматизированного электропривода и в схемах защиты энергосистем.

12.2 Классификация реле

По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода и защиты энергосистем. По принципу действия реле делятся на электромагнитные, поляризованные, тепловые, индукционные, магнитоэлектрические, полупроводниковые и др.

В зависимости от входного параметра реле можно разделить на реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин. Отметим, что реле может реагировать не только на входной параметр, но и на разность значений (дифференциальное реле), изменение знака или скорости изменения входного параметра. Иногда реле, имеющее только один входной параметр, должно воздействовать на несколько независимых цепей. В этом случае реле воздействует на другое, так называемое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется и тогда, когда мощность основного реле недостаточна для воздействия на управляемые цепи.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на контактные и бесконтактные. Выходным параметром бесконтактных реле является резкое изменение сопротивления, включенного в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует большое сопротивление управляемой цепи бесконтактного реле. Это состояние бесконтактного реле называется закрытым.

Замкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует малое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле. Такое состояние бесконтактного реле называется открытым.

Контактные реле воздействуют на нагрузку путём замыкания или размыкания контактов в её цепи, а бесконтактные – путём скачкообразного изменения сопротивления выходной части реле (без механического разрыва цепи нагрузки).

По способу включения реле различаются на первичные и вторичные. Первичные реле включаются в управляемую цепь непосредственно, вторичные — через измерительные трансформаторы.

12.3 Принцип действия и устройство электромагнитных реле, физические явления в электрических аппаратах

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:

- 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. 31,а) представляет собой электромагнитный механизм и ряд контактных групп.

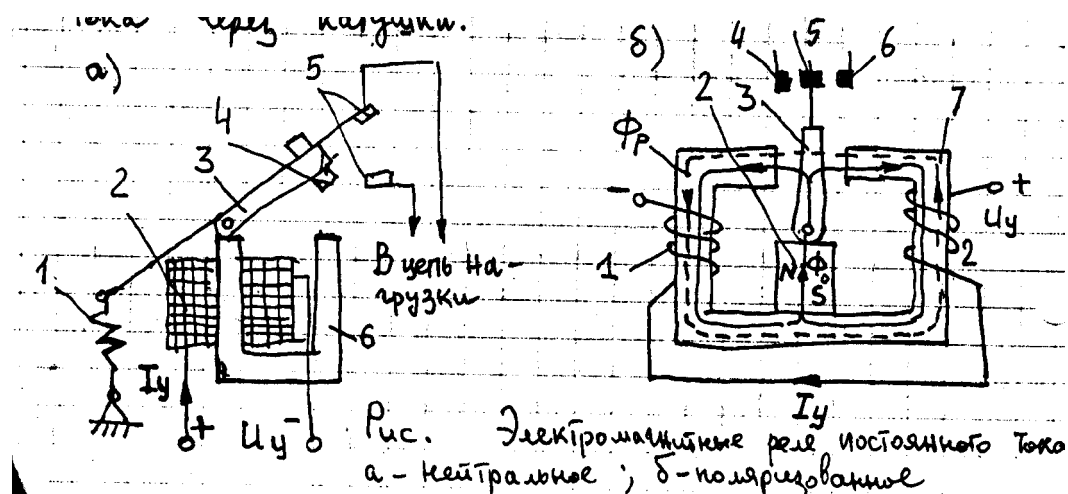


Рис. 31. Электромагнитные реле постоянного тока: а – нейтральное; б – поляризованное реле

Магнитопровод электромагнита состоит из стальных сердечника 6 и подвижного якоря 3. На сердечнике помещается катушка с одной или несколькими обмотками 2. 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 1. Для предотвращения залипания якоря при $I_y = 0$ на нём устанавливается немагнитная прокладка 4 (латунный штифт или пластина).

Поляризованные реле отличаются от нейтральных электромагнитных реле зависимостью выходного сигнала от полярности входного, 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_r , создаваемый рабочими катушками. Главным их недостатком является малое число выходных (управляемых) цепей.

Существует много разновидностей поляризованных реле. На рис. 31,б показано устройство поляризованного реле с дифференциальной магнитной цепью. По магнитопроводу 7 протекают два потока: рабочий поток Φ_r , 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 двух позиционным. 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 ёмкостью $I_y = 0$ шой ёмкости (6 – 8 мкф).

12.4 Основные характеристики и параметры реле

Основные параметры. Основными параметрами электромагнитных реле являются:

- 1) параметр срабатывания $x_{ср}$ – значение входного параметра $x_{ср}$ (напряжения, тока и т.д.), при котором контакты из исходного состояния переходят в рабочее;
- 2) рабочий параметр – параметр x_p (напряжение, ток), обеспечивающий надёжную работу контактов реле (x_p всегда больше $x_{ср}$);
- 3) величина отпускания – значение входного параметра $x_{ср}$, при котором контакты реле переходят из рабочего состояния в исходное;
- 4) коэффициент запаса по срабатыванию $k_{ср} = \frac{x_p}{x_{ср}}$ и по отпусанию

$$k_{отп.} = \frac{x_p}{x_{отп.}};$$

- 5) коэффициент усиления $k_u = \frac{P_{конт}}{P_y}$, показывающий во сколько раз управляемая мощность (на контактах) $P_{конт}$ больше управляющей мощности P_y , потребляемой катушкой;
- 6) время срабатывания $t_{ср}$ – время с момента подачи команды на срабатывание до момента начала возрастания выходного параметра;
- 7) время отпускания $t_{отп.}$ – время, необходимое для полного размыкания контактов после снятия питания с катушки;
- 8) уставка по входному параметру – значения параметров срабатывания или отпускания, на которые отрегулировано реле.

Основные характеристики реле. Основными характеристиками электромагнитных реле являются:

- 1) тяговая (электрохимическая) $P_z = f(\delta)$ – зависимость тяговых усилий P_z , создаваемых на якоре электромагнита магнитным полем катушки, от величины хода якоря δ (воздушного зазора);
- 2) нагрузочная (механическая) $P_m = f(\delta)$ – зависимость сил реакции исполнительных и промежуточных органов реле от величины хода якоря δ ;
- 3) статическая $U_{вых} = f(U_{вх})$ – зависимость напряжения $U_{вых}$ в цепи управления от величины напряжения $U_{вх}$, приложенного к катушке;
- 4) временная (характеристика переходного процесса) $I_k = f(t)$ – зависимость тока в катушке I_k от времени при включении, работе и отключении реле.

Первые три характеристики жёстко зависят от конструкции реле и в процессе настройки и эксплуатации могут быть изменены лишь в малых пределах. Временные характеристики, наиболее важные с точки зрения применения реле в качестве элемента автоматических и телемеханических систем, могут меняться в значительных пределах без изменения конструкции реле. Это достигается путём включения параллельно или последовательно с цепью катушки реле сопротивлений и емкостей.

По виду статической характеристики реле разделяются на двух – и трёхпозиционные. Статическая характеристика двухпозиционного реле, имеющего два устойчивых состояния показана на рис. 4.2. На рис. 4.2 по оси абсцисс отложено значение входного параметра x , а по

оси ординат — выходного параметра y .

До тех пор, пока $x < x_{CP}$, выходной параметр y равен нулю либо своему минимальному значению y_{min} (для бесконтактных аппаратов).

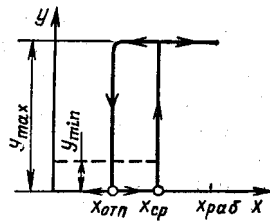


Рис. 32. Характеристика управления реле

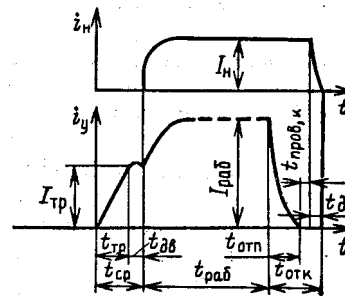


Рис. 33. Выходной и входной параметры электромагнитного реле

При $x = x_{cp}$ выходной параметр скачком меняется от y_{min} до y_{max} . Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение входного параметра, то при $x \leq x_{отп}$ происходит скачкообразное возвращение выходного параметра от значения y_{max} до 0 или y_{min} — отпускание реле. Подобную характеристику имеют, например, электромагнитные реле. Входным сигналом для них является ток в обмотке или напряжение на ней, а выходным — ток или напряжение нагрузки, коммутируемой контактами реле.

На рис. 4.3 даны зависимости входного i_y и выходного i_n параметров электромагнитного реле от времени. Входным параметром в данном случае является ток в обмотке реле, выходным — ток в управляемой цепи (цепи нагрузки).

Для рис. 4.3 принято, что включение обмотки реле происходит при $t=0$. При $t = t_{тр}$ якорь электромагнита реле трогается и начинает движение. В течение времени $t_{дв}$ якорь перемещается и в конце хода замыкается контакт в цепи нагрузки. Ток нагрузки i_n возрастает от нуля до установившегося значения I_n . Время $t_{тр} = t_{тр} + t_{дв}$ называют временем срабатывания реле. После этого ток в обмотке реле продолжает расти до установившегося значения $I_{раб}$. При отключении реле из рабочего состояния $t_{раб}$ цепь его обмотки разрывается и ток в ней падает. В момент времени $t_{отп}$, когда усилие противодействующей пружины становится больше электромагнитного усилия, происходит отпускание якоря. Контакты реле разомкнутся после выбора провала контактов через время $t_{пров.к.}$. После размыкания контактов загорается дуга, которая погаснет через время t_d и ток в нагрузке $i_n = 0$. Время $t_{отк} = t_{отп} + t_{пров.к.} + t_d$ называется временем отключения.

12.5 Требования, предъявляемые к реле

К реле защиты энергосистем, для схем автоматики, а также для управления и защиты электропривода предъявляются требования селективности, быстродействия, чувствительности, высокой надёжности, механической и коммутационной износостойкости до $(1 - 10)10^6$ циклов.

12.6 Согласование тяговых и противодействующих характеристик реле

Согласование тяговых и противодействующих характеристик.

Рассмотрим работу максимального реле постоянного тока с простейшей магнитной системой клапанного типа.

На рис. 34 изображены тяговая и противодействующая характеристики реле. Противодействующие усилия создаются возвратной P_1 и контактными P_2 пружинами.

Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика $P_{Э1}$ во всех точках хода якоря шла выше суммарной противодействующей характеристики.

$$P_{\Pi} = P_1 + P_2.$$

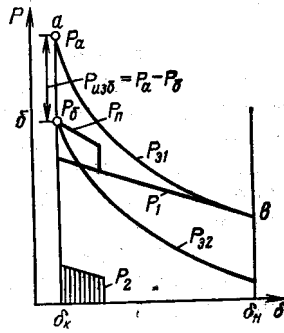


Рис. 34. Согласование характеристик электромагнитного реле

Наименьшее значение тока, при котором кривая P_{31} проходит выше зависимости P_n , называется током трогания $I_{тр}$ реле. Коэффициент запаса при этом $k_3 = I_{раб} / I_{ср}$ и обычно составляет $k_3 = 1,4$.

Для того чтобы устранить залипание якоря, в магнитной системе всегда создается конечный зазор δ_k . При этом тяговое усилие значительно превышает противодействующее ($Pa - P\delta = P_{изб}$). Срабатывание реле определяется точкой в (зазор $\delta = \delta_n$), при котором P_{31} идёт выше P_n .

Для отключения реле тяговая характеристика P_{32} чкой во всех точках должна быть ниже характеристики P_n . При этом усилие, развиваемое противодействующими пружинами, больше электромагнитного усилия и якорь возвратится в начальное положение.

Для реле защиты энергосистем и электропривода коэффициент возврата

$$k_B = I_{отп} / I_{ср} \cong 1.$$

Для конечного зазора $\delta = \delta_k$ $Pa = \kappa_1 I_{ср}^2$,

где Pa – электромагнитное усилие при $\delta = \delta_k$ и токе срабатывания $I_{ср}$; κ_1 – конструктивный фактор.

Для отпускания реле необходимо так уменьшить ток, чтобы развиваемое усилие стало равно

$$P\delta = \kappa_1 I_{отп}^2,$$

откуда

$$k_B = I_{отп} / I_{ср} = \sqrt{\frac{P\delta}{Pa}}.$$

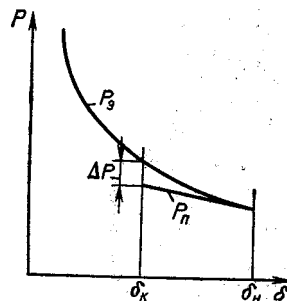


Рис. 35. Условия получения высокого коэффициента возврата

Из рис. 4.5 $Pa - P\delta = Pa - P_{изб}$.

Тогда

$$K_B = \sqrt{\frac{Pa - P_{изб}}{Pa}} = \sqrt{1 - \frac{P_{изб}}{Pa}}.$$

Поскольку $P_{изб} > 0$ $K_B < 1$.

Для увеличения K_v необходимо максимально сблизить тяговую и противодействующую характеристики с целью уменьшения $R_{изб}$.

12.7 Электромагнитные реле тока и напряжения для защиты энергосистем, управления и защиты электропривода

Реле защиты энергосистем. В схемах защиты энергосистем и крупных силовых установок (мощных электродвигателей, трансформаторов) широко применяются реле серии РТ-40. Реле выпускаются на токи от 0,2 до 200 А. Время срабатывания составляет 0,03 с при $I = 3I_{ср}$. Коэффициент возврата $K_v \geq 0,7$. Потребляемая мощность от 0,2 до 8 В А. Мощность коммутируемой цепи 50 Вт постоянного тока при напряжении 220 В.

На базе реле серии РТ-40 выпускаются реле максимального напряжения РН-51, РН-53 и минимальные реле напряжения РН-54.

Реле тока и напряжения для управления и защиты электропривода. В качестве таких реле часто применяются реле постоянного тока серии РЭВ-300 благодаря большому δ_k и малому ходу якоря.

Реле защиты электропривода. Основными требованиями, предъявляемыми к реле защиты электропривода, являются высокое быстродействие ($t_{ср} \leq 0,05$ с), широкая регулировка тока срабатывания, вибро и ударостойкость.

Для работы в электроприводах переменного тока предназначены реле серии РЭВ. Эти реле используются для защиты от токов КЗ, а, в совокупности с реле времени – для защиты от токовых перегрузок.

Катушки токовых реле выполняются на $I_{ном}$ от 2,5 до 600 А. Регулирование уставки по току срабатывания производится изменением натяжения возвратной пружины и находится в пределах 110-700% $I_{ном}$. Реле напряжения допускают регулировку уставки по напряжению срабатывания 70 – 85% $U_{ном}$. K_v токовых реле $K_v = 0,2 - 0,4$.

Время срабатывания реле серии РЭВ 0,06с, время отпускания 0.07с.

12.8 Выбор, применение и эксплуатация максимально-токовых реле

Данные, указанные в паспортах реле и двигателя должны обеспечивать неравенство

$$I_{ном. р} \geq I_{ном. дв} ,$$

где $I_{ном. р}$ и $I_{ном. дв}$ – номинальные токи реле и защищаемого двигателя.

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме

$$I_{ном. дв} = I_{ном. дв. 25},$$

где $I_{ном. дв. 25}$ – номинальный ток двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме при ПВ = 25%.

Схема включения КА приведена на рис. 4.6.

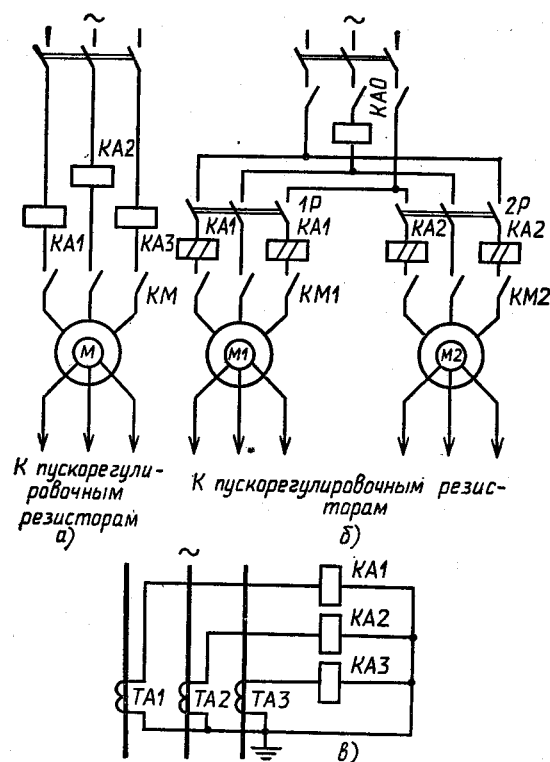


Рис. 36. Схемы включения максимально-токовых реле

Уставка реле по току срабатывания должна быть

$$I_{уст.} \geq (1,3 - 1,5) I_{пуск},$$

где $I_{пуск}$ - пусковой ток двигателя.

Для защиты двигателей с фазным ротором ток срабатывания выбирается из условия

$$I_{уст.} \geq (2,25 - 2,5) I_{ном. дв.}$$

Если несколько двигателей с фазным ротором питаются через общий ввод (рис. 36,б), уставка реле KA1 и KA2 должна быть

$$I_{уст.} \geq (2,25 - 2,5) I_{ном. дв.}$$

Уставка реле KAO составляет

$$I_{уст.} = (1,25 - 1,5) I'_{ном. дв. 25} + \Sigma I_{ном. дв. 25},$$

где $I'_{ном. дв.}$ - номинальный ток двигателя наибольшей мощности (режим ПВ = 25%); $\Sigma I_{ном. дв. 25}$ - сумма номинальных токов всех двигателей, защищаемых KAO. Если двигатели включаются на длительный режим, то $I_{ном. дв.} = I_{ном. дв.}$

Коммутационная способность N_k KA должна соответствовать номинальным значениям тока и напряжения катушек контакторов KM, KM1, KM2, в цепи которых включены реле. При выборе KA следует учитывать, что пусковой ток электромагнита контактора может быть в 10 – 15 раз больше установившегося значения и что этот ток контакты KA должны отключать. Ток отключения реле $I_{откл.р.} \geq (2,25 - 2,5) I_{кат}$ тока катушки контактора.

Если токи цепи двигателей достаточно велики, то реле защиты включается в цепь с помощью трансформаторов тока TA (рис. 36,в).

Для того, чтобы защитить двигатель при затянувшемся пуске (велика нагрузка на валу) или кратковременной пиковой перегрузке, KA воздействует на контактор через реле времени

КТ (рис. 37), которое запускается с помощью реле КА4. При нормальном пуске или кратковременной перегрузке, безопасной для двигателя, время пуска или перегрузки меньше времени выдержки $t_{кт}$ и контактор КМ в цепи двигателя М не отключается. При этом реле КА4 отпадает и снимает напряжение с реле КТ. Если время пуска или перегрузки $t_{пуск} > t_{кт}$, то контакты КТ размыкаются, контактор КМ отключается и двигатель М обесточивается. Такая схема может использоваться в схемах реверса двигателя.

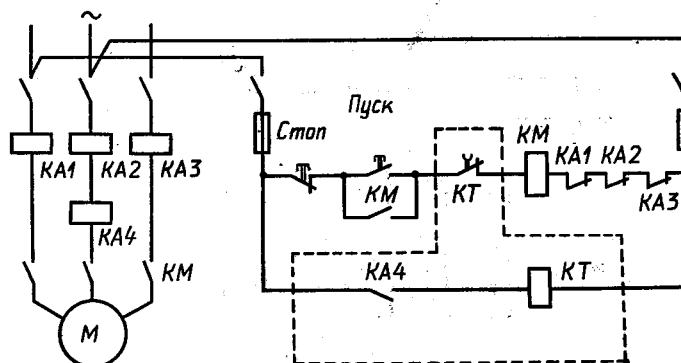


Рис. 37. Схема максимальной токовой защиты с реле времени

Ток уставки реле КА4 выбирается по условию

$$I_{уст} \leq 0,75 I_{пуск}.$$

Ток возврата реле должен быть больше номинального тока двигателя на 30%. Номинальные токи реле и двигателя должны удовлетворять условию

$$I_{ном.р.} \leq I_{ном.дв.}$$

13 ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ (ГР)

13.1 Назначение, принцип действия и устройство геркона; физические явления в электрическом аппарате

Назначение геркона. Герконы - это реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами. Они широко используются в схемах автоматики и защиты как логические элементы, преобразователи неэлектрических величин в электрические, как электромеханические усилители сигналов между полупроводниковыми устройствами и силовыми электрическими аппаратами.

Принцип действия и устройство геркона. Простейшее герконовое реле (ГР) с замыкающими контактами изображено на рисунке 4.2.1, а.

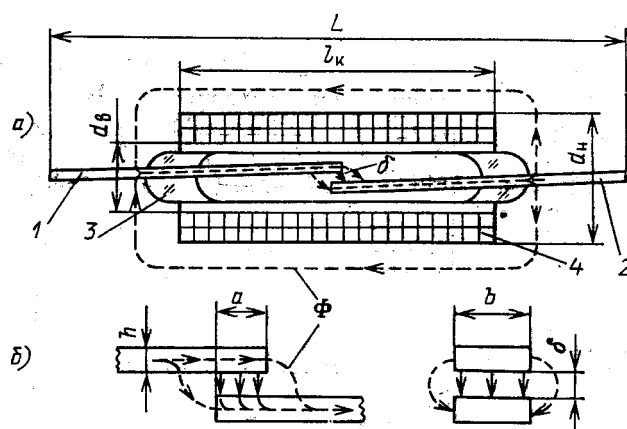


Рис. 38. Простейшее герконовое реле с симметричным замыкающим контактом

Контактные сердечники (КС) 1 и 2 изготавливаются из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллоя) и ввариваются в стеклянный герметичный баллон 3. Баллон заполнен инертным газом - чистым азотом или азотом с небольшой (около 3%) добавкой водорода. Давление газа внутри баллона составляет (0, 4-5-0, 6) $\cdot 10^5$ Па. Инертная среда предотвращает окисление КС. Баллон устанавливается в обмотке управления 4. При подаче тока в обмотку возникает магнитный поток Φ , который проходит по КС 1 и 2 через рабочий зазор 8 между ними и замыкается по воздуху вокруг обмотки 4. Упрощенная картина магнитного поля показана на рисунке 39. Поток Φ при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу $P_{\text{э}}$, которая преодолевая упругость КС, соединяет их между собой. Для улучшения контактирования поверхности касания покрываются тонким слоем (2-50 мкм) золота, родия, серебра и др.

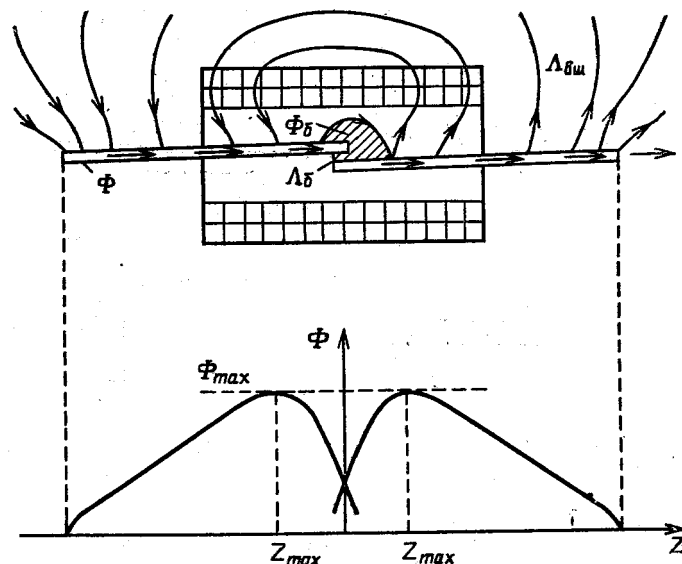


Рис. 39. Упрощенная картина магнитного поля геркона управляемого обмоткой с током

При отключении обмотки магнитный поток и электромагнитная сила спадают и под действием сил упругости КС размыкаются. Т. о, в ГР отсутствуют детали, подверженные трению (места крепления якоря в электромагнитных реле), а КС одновременно выполняют функции магнитопровода, токопровода и пружины.

В связи с тем, что контакты в герконе управляются магнитным полем, герконы называют магнитоуправляемыми контактами.

На основе герконов могут быть созданы также реле с размыкающими и переключающими контактами.

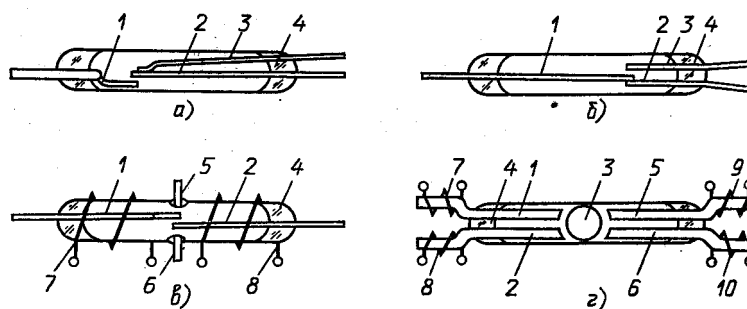


Рис. 40. Переключающие герконы

В герконе с переключающими контактами (Рис. 40, а) неподвижные КС 1, 3 и подвижные 2 размещены в баллоне 4. При появлении сильного магнитного поля КС2 притягивается к КС1 и размыкается с КС3. Один из КС переключающего геркона (например 2) может быть вполне из немагнитного материала (рис. 40,б).

Герконовое реле (рис. 40,в) имеет два подвижных КС 1, 2, два неподвижных КС 5, 6 и две обмотки управления 7, 8. При согласном включении обмоток замыкаются КС 1 и 2. При встречном включении обмоток КС1 замыкается с КС5, а КС2 с КС6. При отсутствии тока в обмотках все КС разомкнуты. ГР (рис. 40,г) имеет переключающий контакт 3 сферической формы. При согласном включении обмоток 7 и 8, контакт 3 притягивается к КС1 и КС2 и замыкает их. После отключения обмоток 7 и 8 при согласном включении обмоток 9 и 10 контакт 3 замыкает КС5 и КС6.

Т.к. КС герконов выполняют функции возвратной пружины, то им придают определенные упругие свойства. Упругость КС обуславливает возможность их вибрации ("дребезга") после удара, который сопутствует срабатыванию. Длительность такой вибрации достигает 0,25 мс при общем времени срабатывания 0,5-1,0 мс. Одним из способов устранения влияния вибрации является использование жидкометаллических контактов.

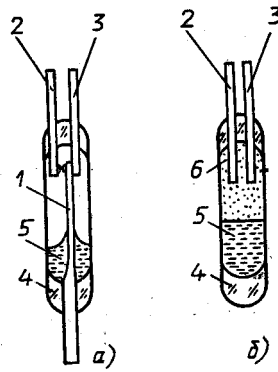


Рис. 41. Ртутные герконы

В переключающем герконе (рис. 41, а) внутри подвижного КС имеется капиллярный канал, по которому из нижней части баллона 4 поднимается ртуть 5. Ртуть смачивает поверхности касания КС1 с КС2 или КС3. В момент удара контактов при срабатывании возникает их вибрация. Из-за ртутной пленки на контактной поверхности КС1 вибрация не приводит к разрыву цепи. В конструкции на рис. 41, б между КС2 и КС3 и ртутью 5 находится ферромагнитная изоляционная жидкость 6. При возникновении магнитного поля ферромагнитная жидкость 6 перемещается вниз, в положение при котором поток будет наибольшим. Ртуть вытесняется вверх и замыкает контакты КС2 и КС3.

Следует отметить, что жидкометаллический контакт позволяет уменьшить переходное сопротивление и значительно увеличить коммутируемый ток. Наличие ртути удлиняет процесс разрыва контактов, что увеличивает время отключения реле.

Управление герконом можно осуществлять и с помощью постоянного магнита. Если постоянный магнит установлен вблизи геркона, его магнитный поток замыкается через КС, которые в результате этого находятся в замкнутом состоянии. Использование постоянного магнита совместно с управляющей катушкой позволяет создать ГР с размыкающим контактом.

13.2 Основные параметры герконового реле

Основными характеристиками геркона являются: тяговые $R_z(\delta)$ и противодействующая $R_{пр}(\delta)$ и время срабатывания.

Упрощенная схема замещения магнитной цепи геркона имеет вид (рис. 42). Здесь обозначены: L_{δ} - полная магнитная проводимость рабочего зазора с учетом потоков выпучивания; $L_{вш}$ - проводимость пути магнитного потока по воздуху вне КС; $L_{кс}$ - суммарная магнитная проводимость обоих КС; Φ - магнитный поток, созданный обмоткой; F - МДС обмотки.

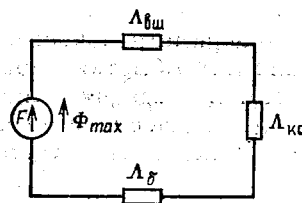


Рис. 42. Упрощенная схема замещения магнитной цепи геркона

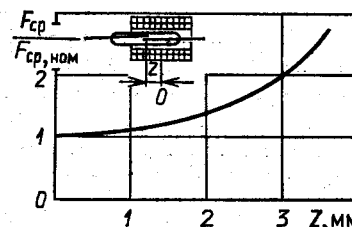


Рис. 43. Влияние смещения Z центра обмотки относительно центра перекрытия КС на МДС срабатывания геркона $F_{ср}$

Вблизи рабочего зазора образуются заметные магнитные потоки выпучивания. В результате магнитный поток Φ в сечении КС уменьшается по мере приближения к зазору δ .

Электромагнитная сила, действующая на КС, выражается через конструктивные

При $F = F_1$ равновесное состояние $P_3(\delta_1) = P_{пр}(\delta_2)$ определяется точкой А. При дальнейшем увеличении МДС точки равновесия поднимаются. При МДС $F_{ср}$ и зазоре $\delta = \delta_3$ (точка Б) происходит срабатывание и замыкание КС реле. Зазор $\delta_3 = \delta_{ср}$ называется зазором срыва. КС переходит в конечное положение, определяемое зазором $\delta_4 = \delta_K$, который определяется толщиной контактного покрытия и неровностями контактной поверхности. $P_{э.к}$ - конечная электромагнитная сила, $P_{к.н}$ - контактное нажатие, $P_{пр.к}$ - конечная сила пружины.

Разность $P_{\text{Э.К}} - P_{\text{ПР.К}} = P_{\text{К.Н}}$ определяет контактное нажатие.

Время срабатывания ГР можно определить по уравнению

$$t = (\delta_{\text{Н}} - \delta_{\text{К}}) \sqrt{\frac{m}{A}},$$

где m - эквивалентная масса подвижной части КС;

A - постоянная, определяемая размерами, материалом и жесткостью КС.

Для размыкания контактов ГР необходимо, чтобы тяговая характеристика опустилась ниже точки В.

Коэффициент возврата ГР $K_{\text{В}} = F_{\text{ОТП}} / F_{\text{СР}}$, где $F_{\text{ОТП}}$ - МДС опускания. $K_{\text{В}} = 0,3-0,9$.

13.3 Конструкции герконовых реле

ГР разнообразны по конструкции и назначению. Конструктивные исполнения ГР: с разомкнутой магнитной цепью (рис. 45,а); с кожухом (экраном) из магнитомягкого материала (рис. 45,б,в); с магнитным шунтом (рис. 45, г); с осевым смещением геркона в обмотке (рис. 45), многоцепевые ГР с расположением геркона внутри или вне катушки; герконовое реле тока; поляризованное ГР; управление герконом с помощью постоянного магнита; ГР с магнитной памятью, герконы с большей коммутационной способностью.

Конструкция ГР (рис. 45,а) имеет разомкнутую цепь. По этой причине большая доля МДС расходуется на проведение магнитного потока по воздуху. Кроме того, конструкция подвержена воздействию внешних магнитных полей, создаваемых расположенными рядом электротехническими устройствами.

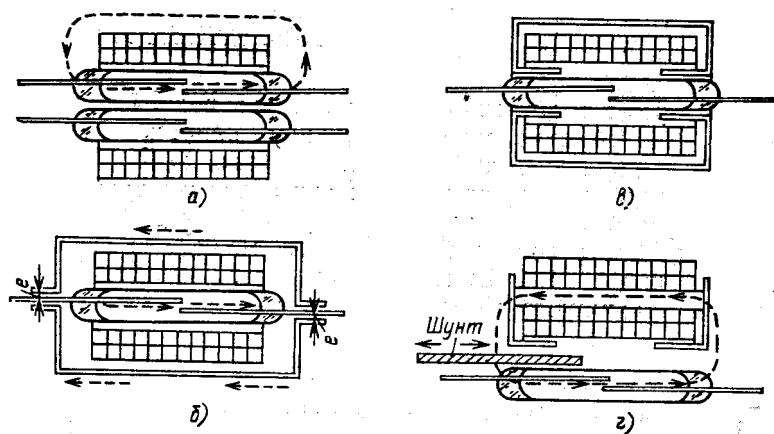


Рис. 45. Конструкции выполнения ГР

Для устранения этого недостатка магнитная система ГР заключается в кожух (экран) из магнитомягкого материала (рис. 45,б,в). Регулирование МДС срабатывания и отпускания может производиться за счет изменения зазора e (рис. 45, б) или положения магнитного шунта (Рис. 45, г), либо осевого смещения геркона в обмотке. Герконы могут быть установлены внутри и с наружи управляющей обмотки (многоцелевые ГР) . Конструкция с внешним расположением герконов предпочтительнее чем с внутренним, т.к. обеспечивает меньшее взаимное влияние соседних герконов. Число герконов в одном реле может достичь 12 и более.

13.4 Реле тока на герконе

В реле контроля большого тока используется компоновка указанная на рис. 46.

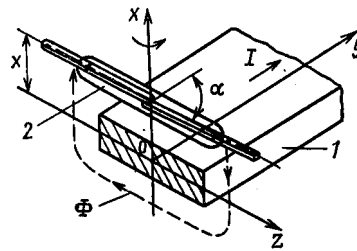


Рис. 46. Реле тока на герконе

Ток проходит по шине 1. Магнитное поле этого тока замыкается внутри шины и по КС геркона 2. $I_{ср}$ геркона может регулироваться за счет изменения угла α и расстояния между шиной и герконом.

13.5 Поляризованные ГР

В поляризованном ГР кроме основного герконе поля управления (МДС F_y) создается дополнительное поляризующее магнитное поле за счет специальной обмотки (МДС F_n) или постоянного магнита (рис. 47).

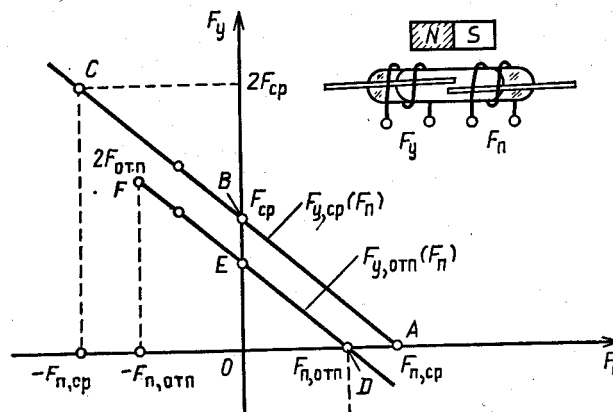


Рис. 47. Характеристика поляризованного герконового реле

Если $F_n \gg F_{y \text{ ср.}}$, то под действием МДС F_n контакты геркона замкнутся. Для размыкания контактов МДС F_y должна быть меньше F_n и иметь обратный знак.

13.6 Управление герконом с помощью ферромагнитного экрана

Управлять состоянием геркона можно с помощью не только магнитного поля, создаваемого катушкой управления, но и поля постоянного магнита. Такой способ широко используется в современных слаботочных аппаратах управления (тумблеры, переключатели, кнопки, командоаппараты) и КИП (сигнализаторы положения, конечные выключатели, датчики). Состояние геркона изменяется при приближении или удалении от него постоянного магнита.

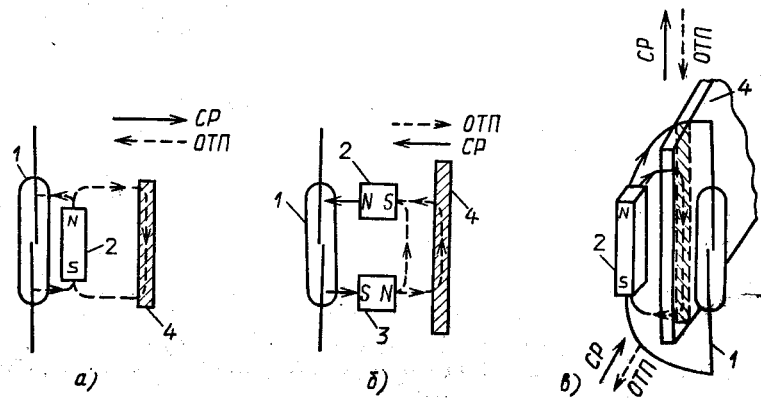


Рис. 48. Управление герконом с помощью ферромагнитного экрана: *а* - геркон 1 срабатывает при удалении экрана 4 и магнита 2; *б* - геркон 1 срабатывает при приближении к магнитам 2 и 3 экрана 4; *в* - геркон 1 срабатывает при удалении экрана 4 из зазора между герконом и постоянным магнитом 2

Следует отметить, что при наличии постоянного магнита управление герконом может производиться за счет ферромагнитного экрана (рис. 48).

14 ГЕЗАКОНЫ И ГЕРКОНЫ

14.1 ГР с магнитной памятью

Простейшее ГР с магнитной памятью показано на рис. 4.2.12, а. Два элемента магнитной памяти (ЭМП) 1 и 1' примыкают к КС геркона 3. При появлении управляющего импульса и согласном включении обмоток 2 и 2' создаваемый ими магнитный поток проходит через КС и оба ЭМП, которые намагничиваются. После прохождения импульса КС притягиваются за счет остаточной индукции ЭМП. Для отключения реле в обмотку 2 подается импульс тока, той же полярности и амплитуды, а в обмотку 2' - той же амплитуды и обратной полярности. За счет разности МДС обмоток происходит размагничивание ЭМП и уменьшение магнитного потока в зазоре между КС и они размыкаются. Для надежного управления длительность импульса тока срабатывания берется 100 -300 мкс.

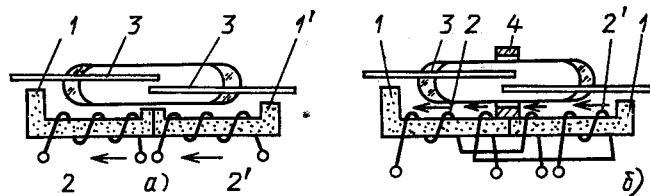


Рис. 49. Герконовые реле с магнитной памятью

Для уменьшения минимально необходимого импульса МДС отпускания устанавливается магнитомягкий шунт 4 в зоне рабочего зазора геркона (рис. 49,б). При подаче разнополярных импульсов в обмотки 2 и 2' магнитный поток замыкается через КС, магнитный шунт 4 и ЭМП, минуя рабочий зазор геркона. После их соударения начинается вибрация контактов, которая длится 0,5 - 2,5 мс. Общее время срабатывания геркона с памятью 1-3 мс. У герконов (рис. 50,б) оно меньше (1-2 мс).

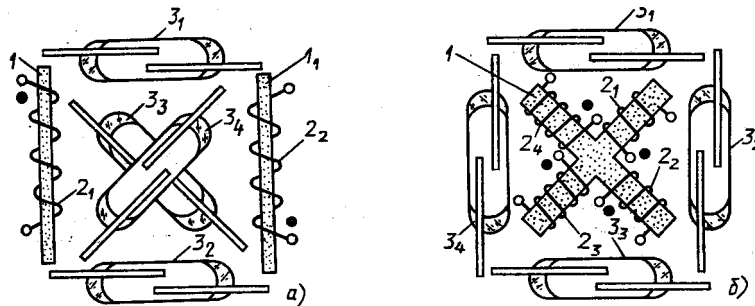


Рис. 50. Многоцепевые ГР с магнитной памятью

ГР с магнитной памятью и переключающими контактами (рис. 50) имеет два ЭМП 1 и 1' и две обмотки управления 2 и 2'. При согласном включении обмоток и подаче на них импульсов одинаковой полярности магнитный поток, созданный ЭМП1 и 1', проходит через КС герконов 3₁ и 3₂ и они замыкаются. По КС герконов 3₃ и 3₄ магнитный поток не проходит, т.к. в месте их расположения магнитные потоки от ЭМП 1 и 1' встречны. После прохождения управляющего импульса герконы 3₁ и 3₂ остаются замкнутыми, а 3₃ и 3₄ -разомкнутыми. При подаче на обмотку 2₁ импульса того же знака, а на обмотку 2₂ а такого же импульса обратного знака происходит изменение направления намагничивания ЭМП 1₁. При этом магнитные потоки проходят через рабочие зоны герконов 3₁ и 3₂, которые размыкаются благодаря упругим свойствам КС.

В ГР на рис. 50,б возможны 16 комбинаций замкнутых и разомкнутых герконов в

зависимости от того, какие обмотки включены. Например, если все обмотки включены так, что создаваемые ими потоки направлены от центра к периферии, то все герконы будут разомкнуты.

14.2 Конструкция гезаконов

Реле с магнитной памятью могут быть построены на базе специальных герконов, в которых ЭМП частично или полностью расположены внутри баллона. Такие герконы иногда называют *гезаконами* (герметичными запоминающими контактами). Возможные исполнения гезаконов показаны на рис. 51. Для исполнения по рис. 51, а КС 1 и 2 изготавливаются из реманентных материалов 35КХ12, 35КХ15, 40КНБ (сплавы кобальта и хрома) и выполняют функции ЭМП. Соединительные пластины 6 соединяют выводы геркона с КС 1 и 2. В исполнении по рис. 51, б из реманентного материала выполнен только КС2. На баллоны гезаконов устанавливаются 2 обмотки управления. При согласном включении обмоток КС намагничиваются и замыкаются. Для размыкания необходимо при последующем включении изменить полярность импульса в одной из обмоток, что приводит к размыканию КС.

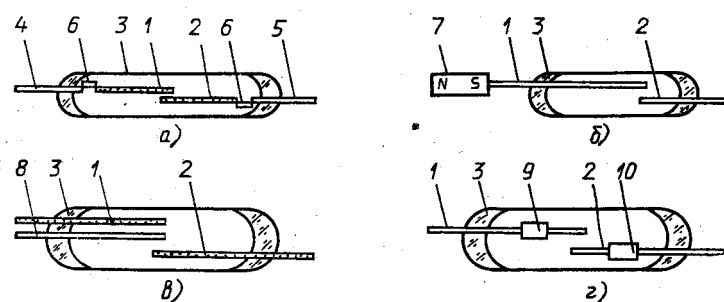


Рис. 51. Конструкция гезаконов: 1,2,8 - КС; 3 - баллон; 4,5 -выводы; 6 - соединительная пластина; 7 - постоянный магнит; 9,10 - ЭМП

В случае рис. 51, в управление происходит от одного источника разнополярных импульсов. Через вывод 1 замыкается поток поляризующего постоянного магнита 7. При подаче управляющего импульса, создающего поле, согласное с полем постоянного магнита, эти поля складываются и КС замыкаются. При подаче встречного импульса КС размагничиваются и размыкаются.

Переключающий гезакон (рис. 51,в) имеет две обмотки управления. При согласном включении обмоток КС, 1 и 2 намагничиваются согласно, и КС 8 притягивается к КС 2. При изменении полярности импульса в одной из обмоток меняется направление намагниченности одного из КС и КС 8 притягивается к КС 1.

В гезаконе на рис. 51,г ЭМП выполнены в виде трубок 9, 10, надеваемых на КС 1 и 2. При согласном включении обмоток управления трубки ЭМП 9 и 10 намагничиваются согласно и КС замыкаются. Для отключения геркона в одной из обмоток надо поменять полярность импульса.

14.3. Силовые герконы

С целью увеличения коммутируемого тока и мощности в конструкцию герконов можно ввести дугогасительные контакты (рис. 52,а).

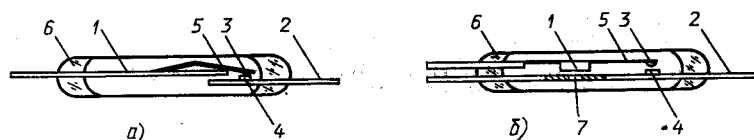


Рис. 52. Силовые герконы

В стеклянном корпусе 6 укреплены подвижные КС1 и неподвижные КС2. Пластина 5, выполняющая функцию дугогасительного контакта, упирается в КС 1, благодаря чему создается ее упругая деформация. При включении вначале замыкаются дугогасительные контакты 3 и 4. Затем замыкаются главные контакты. При отключении вначале размыкаются главные контакты 1 и 2, затем дугогасительные 3 и 4.

В другой конструкции силового геркона (рис. 52,б) функции главных контактов выполняются КС 1 и 2. Отверстие 7 в КС 2 приводит к быстрому насыщению материала. При этом магнитный поток из КС 2 переходит в перемычку 1, и КС 1 притягивается к КС 2. Сначала замыкаются дугогасительные контакты 3 и 4, затем главные 1 и 2.

В настоящее время серийно выпускаются т.н. герсиконы (герметичные силовые контакты). На основе герсикона КМГ-12 выпускаются контакторы. Герсиконы типа КМГ-12 выпускаются на $I_n = 6,3$ А, включаемый ток до 180 А, отключаемый ток 63 А.

14.4 Расчёт обмотки геркона

Важнейшим параметром геркона, приводимым в его паспорте, является МДС срабатывания $F_{ср}$, по значению которой можно определить параметры обмотки. Расчетная МДС обмотки

$$F_P = k_F k_n F_{ср},$$

где $k_F = 1,2-2$ - коэффициент запаса, учитывающий технический разброс параметров геркона, допустимые колебания питающего напряжения и изменения сопротивления обмотки при нагреве; k_n - коэффициент, учитывающий взаимное влияние совместно установленных герконов. По опытным данным $k_n = \sqrt{n}$, где n - число герконов в реле.

Диаметр неизолированного провода d_{np} находится из формулы

$$\pi d_{np}^2 / 4 = q = F \rho_\tau l_{ср} / U,$$

где ρ_τ - удельное сопротивление материала провода обмотки в горячем состоянии; $l_{ср}$ - средняя длина витка обмотки; U - напряжение источника.

ρ_τ находим по формуле

$$\rho_\tau = \rho_0 [1 + \alpha_R (\tau_{доп} + \theta_{0кр} + \theta_0)],$$

где ρ_0 -

Для медного провода $\rho_0 = 0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом-м при температуре $\theta_0 = 20$ °С; $\theta_{0кр}$ - температура окружающей среды, °С; $\tau_{доп} = \theta_{доп} - \theta_{окр}$ - допустимое превышение температуры обмотки, °С;

$$\alpha_R = 0,0041 \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

Средняя длина витка

$$l_{ср} = \pi D_{ср} = \pi (d_B + 2h_K) / 2 = \pi (d_B + h_K),$$

где $d_B = d_б + 2(\Delta + \Delta_{кар})$ - внутренний диаметр обмотки; $d_б$ - диаметр баллона геркона; Δ - зазор между баллоном и каркасом; $\Delta_{кар}$ - толщина каркаса катушки управления; h_K - радиальная толщина обмотки.

Для получения минимальной МДС срабатывания площадь сечения обмотки Q и ее радиальная толщина h_k выбираются по соотношениям

$$Q=3d(L+\pi d)/8; h_k = Q/l_k \cong d_B; l_k = 4d(L+\pi d)/d_B,$$

где d - диаметр стержня КС; L - длина геркона.

Ориентировочно длина обмотки $l_k = (0,25-0,5)L$. Найденный диаметр d_{np} округляется до стандартной величины.

Число витков обмотки

$$\omega = h_k l_k K_{3M}/q,$$

K_{3M} - коэффициент заполнения обмотки медью берется для принятого d_{np} .

Расчет превышения температуры τ обмоток для установившегося режима

$$\tau = P/(k_T S_{охл}),$$

где K_T - коэффициент теплоотдачи ($10 \text{ Вт м}^{-2}\text{°C}^{-1}$); $S_{охл}$ - поверхность охлаждения обмотки; P - мощность выделяемая в обмотке.

$$P = I^2 R = U^2 / R = U^2 q / (\rho_\tau l_{cp} \omega) = U^2 q / [\rho_\tau \pi (d_B + h_k) \omega]$$

Поверхность охлаждения $S_{охл} = \pi (d_B + 2h_k) l_k$..

Диаметр провода d_{np} проверяем из условий нагрева в установившемся режиме

$$I^2 R = 4 I^2 \rho_\tau l_{cp} \omega / (\pi d_{np}^2) = K_T S_{охл} \tau.$$

После выбора d_{np} проводим проверочный расчет F и τ с учетом коэффициента заполнения K_{3M} . Если обмотка работает в режиме кратковременного включения, то допустимое время включения

$$t_{вкл} = T \ln \tau_p / (\tau_p - \theta_{доп} + \theta_{окр}),$$

где τ_p - допустимое превышение температуры; T - постоянная времени нагрева обмотки.

$$T = c G / (K_T S_{охл}) = \frac{c (\pi d_{np}^2 / 4) \cdot [(2d_B + 2h_k) / 2] \cdot \gamma}{\pi \cdot K_T (d_B + 2h_k) l_k}$$

где c - удельная теплоемкость материала провода [для меди $c = 390 \text{ Вт-с/ (кг -°C)}$] ; G - масса провода, кг; γ - плотность материала провода, кг/м^3 (для меди $\gamma = 8900 \text{ кг/м}^3$).

Нагрев геркона при повторно кратковременном режиме рассчитывается по известной методике.

15 ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

15.1 Основные понятия, физические явления в электрических аппаратах

Электромагнитные механизмы применяются для приведения в действие многих аппаратов. Конструкции электромагнитов равнообразны, они могут быть классифицированы:

1) по способу действия: *удерживающие* — для удержания тех или иных грузов или деталей (например, электромагнитные столы станков, электромагниты подъемных кранов и т. п.); *притягивающие* — совершают определенную работу, притягивая свой якорь;

2) по способу включения: *с параллельной катушкой* — ток в катушке определяется параметрами самого электромагнита и напряжением сети; *с последовательной катушкой* — катушка включается в силовую цепь, ток в катушке определяется не параметрами электромагнита, а теми устройствами (машины, аппараты), в цепь которых включена катушка;

3) по роду тока: *постоянного тока* — при параллельном включении ток в катушке зависит от сопротивления ее обмотки и приложенного напряжения, электромагнитная система работает при постоянной МДС; *переменного тока* — при параллельном включении ток в катушке зависит от индуктивности системы, меняющейся обратно пропорционально воздушному зазору, электромагнитная система работает при постоянстве потокосцеплений;

4) по характеру движения якоря: *поворотные* — якорь поворачивается вокруг какой-то оси или опоры (рис. 53, а и б); *прямоходовые* — якорь перемещается поступательно (рис. 53, в и г).

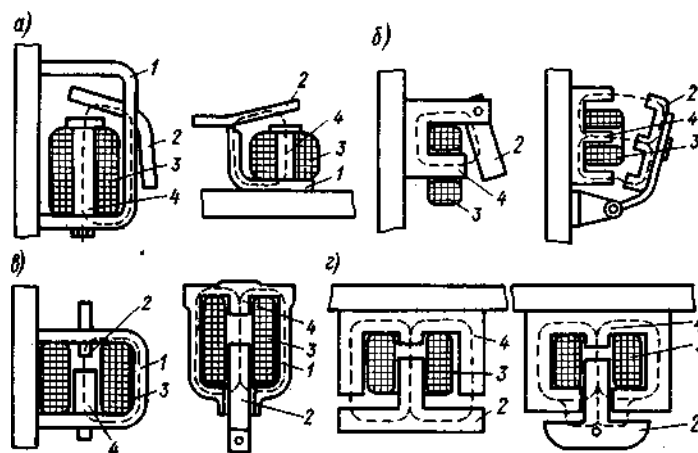


Рис. 53. Схемы электромагнитов: а, б — с поворотным якорем; в, г — с прямоходовым якорем
1 — скоба; 2 — якорь; 3 — катушка; 4 — сердечник

15.2 Энергия магнитного поля и индуктивность системы

Определим энергию в электромагните при неподвижном якорь и при включении катушки на напряжение постоянного тока. Ток в ней установится не мгновенно, а по некоторой кривой (рис. 54). Приложенное к катушке напряжение U в переходном процессе уравнивается активным падением напряжения ir и ЭДС самоиндукции e :

$$U = ir + e_m \quad (1)$$

ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения потокосцепления обмотки:

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

Умножив уравнение (53) на idt и взяв интеграл, получим энергетический баланс электромагнита за время переходного процесса:

$$\int_0^t Uidt - \int_0^t i^2 r dt = \int_0^\psi id\psi, \quad (3)$$

где $\int_0^t Uidt$ — энергия, поступившая из сети; $\int_0^t i^2 r dt$ — потери энергий в катушке электромагнита; $\int_0^\psi id\psi = W_M$ — энергия, сообщенная электромагниту.

Таким образом, энергия, сообщенная электромагниту, равна энергии, поступившей из сети, за вычетом потерь в катушке и магнитопроводе.

При установившемся режиме $Uidt = i^2 r dt$, т. е. вся поступающая из сети энергия расходуется на потери в катушке.

Говоря о потокосцеплении ψ , следует иметь в виду, что его значение является сложной функцией тока. Зависимость $\psi = \omega\Phi = f(i)$ представлена на рис. 55. Она учитывает нелинейность кривой намагничивания для стали и зависит от тока, материала и размеров магнитопровода и воздушного зазора. Запасенная в электромагните энергия на графике пропорциональна площади, ограниченной

$\psi = f(i)$ и осью ординат (заштрихованная площадь).

Как известно, отношение

$$\psi / I = L, \quad (4)$$

где I — ток в катушке; L представляет собой индуктивность системы. Для системы со сталью (кривая 2 на рис. 5-3) индуктивность не является постоянной величиной, а зависит от степени насыщения системы. Каждому значению потоко-сцепления будут соответствовать какая-то индуктивность и определенное значение запасенной энергии, т. е.

$$W_M = \int_0^\psi id\psi = \int_0^I iLdi = L \frac{I^2}{2}, \quad (5)$$

откуда $L = 2W_M/I^2$.

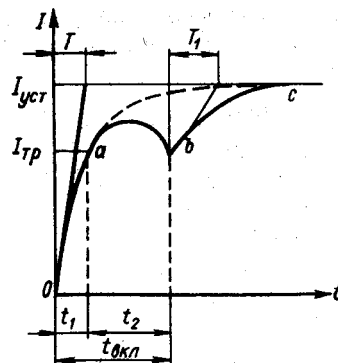


Рис. 54. Кривая нарастания тока в катушке при включении электромагнита постоянного тока

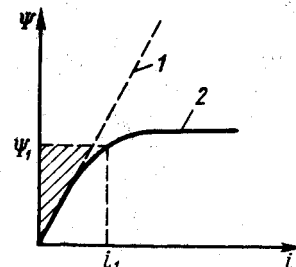


Рис. 55. Зависимость $\psi = f(i)$; 1 — в цепи без стали; 2 в цепи со сталью

15.3 Работа, производимая якорем магнита при перемещении

При включении притягивающего электромагнита якорь переместится и приблизится к сердечнику, зазор уменьшится. Допустим, что в начале движения якоря $\delta = \delta_1, I = I_1, \psi = \psi_1$, а в конце движения $\delta = \delta_2, I = I_2, \psi = \psi_2$.

Энергия, запасенная в момент начала движения (рис. 56, а),

$$W_{M1} = \int_0^{\psi_1} i d\psi \sim \text{площадь } Oa_1b_1 \quad (6)$$

Энергия, приобретенная за время движения,

$$\Delta W_M = \int_0^{\psi_2} i d\psi \sim \text{площадь } b_1a_1a_2b_2, \quad (7)$$

а энергия, запасенная в момент окончания движения,

$$W_{M2} = \int_0^{\psi_2} i d\psi \sim \text{площадь } Oa_2b_2 \quad (8)$$

Таким образом, согласно закону сохранения энергии, энергия, пропорциональная площади Oa_1a_2 , пошла на механическую работу ΔA перемещения якоря:

$$\Delta A = W_{M1} + \Delta W_M - W_{M2} \sim \text{площадь } Oa_1a_2. \quad (9)$$

Для ненасыщенной системы (рис. 56,б)

$$W_{M1} = \frac{I_1\psi_1}{2}; W_{M2} = \frac{I_2\psi_2}{2}; \Delta W_M = \frac{I_1 + I_2}{2}(\psi_2 - \psi_1); \quad (10)$$

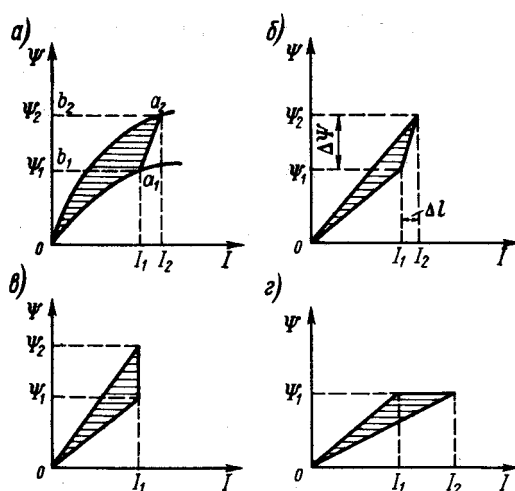


Рис. 56. Графики к определению работы электромагнита

$$\Delta A = \frac{1}{2}(I_1\psi_2 - I_2\psi_1); \quad \psi_2 = \psi_1 + \Delta\psi, \quad I_2 = I_1 + \Delta I;$$

тогда

$$\Delta A = \frac{1}{2} [I_1 (\psi_1 + \Delta \psi) - \psi_1 (I_1 + \Delta I)] = \frac{1}{2} (I_1 \Delta \psi - \Delta I \psi_1) .$$

Перейдя к пределу и опустив индексы, получим

$$dA = \frac{1}{2} (I d\psi - \psi dI) \quad (11)$$

Аналогично для системы, работающей при неизменной МДС (рис. 56, в),

$$\Delta A = \frac{1}{2} I (\psi_2 - \psi_1); \quad dA = \frac{1}{2} I d\psi \quad (12)$$

а для системы, работающей при неизменном потокоцеплении (рис. 57, г),

$$\Delta A = \frac{1}{2} \psi (I_2 - I_1); \quad dA = \frac{1}{2} \psi dI \quad (13)$$

15.4 Вычисление сил и моментов электромагнита

При перемещении якоря электромагнита из положения δ_1 в положение δ_2 , т. е. за путь $\Delta \delta$, им произведена работа ΔA . Следовательно, средняя сила притяжения P_{cp} , действовавшая на этом отрезке,

$$P_{cp} = \Delta A / \Delta \delta . \quad (14)$$

Переходя к пределу, получим формулы для вычисления сил и моментов притяжения якоря электромагнита:

$$P = \frac{dA}{d\delta}; \quad M = \frac{dA}{d\alpha} \quad (15)$$

где $d\alpha$ — угол поворота якоря, соответствующий изменению воздушного зазора на $d\delta$. Подставив в уравнение (15) выражение (11) для dA , получим в общем случае

$$P = \frac{1}{2} \left(I \frac{d\psi}{d\delta} - \psi \frac{dI}{d\delta} \right) . \quad (16)$$

В электромагнитных системах, работающих при постоянной МДС, $I = \text{const}$ и $dI/d\delta = 0$, тогда

$$P = \frac{1}{2} I \frac{d\psi}{d\delta} . \quad (17)$$

Согласно выражению (4) $\psi = LI$, откуда

$$\frac{d\psi}{d\delta} = I \frac{dL}{d\delta} + L \frac{dI}{d\delta} = I \frac{dL}{d\delta}$$

так как при $I = \text{const}$, $dI/d\delta = 0$, то

$$P = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\delta} . \quad (18)$$

Учитывая, что $L = \omega^2 \Lambda$, где Λ — проводимость воздушного зазора, ω — число витков катушки, получим

$$\frac{dL}{d\delta} = \omega^2 \frac{d\Lambda}{d\delta}; P = \frac{1}{2} \omega^2 I^2 \frac{d\Lambda}{d\delta} . \quad (19)$$

Здесь произведение ωI представляет собой МДС F_δ , приложенную к воздушному зазору. В таком случае

$$P = \frac{1}{2} F_\delta^2 \frac{d\Lambda}{d\delta} . \quad (20)$$

Для электромагнитных систем, работающих *при постоянном потокоцеплении* $\psi = \text{const}$, $d\psi/d\delta = 0$ и

$$P = \frac{1}{2} \psi \frac{dI}{d\delta} \quad (21)$$

Так как $I = \frac{\psi}{L}$; $\frac{dI}{d\delta} = - \frac{\psi}{L^2} \frac{dL}{d\delta}$; $\psi = \frac{U}{\omega}$, то

$$P = \frac{1}{2} \frac{U^2}{\omega^2 L^2} \frac{dL}{d\delta} \quad (22)$$

Заменив в формуле (22) $U/\omega = \Phi_\delta / \sqrt{2}$, а $L = \omega^2 \Lambda$, получим

$$P = \frac{1}{4} \frac{\Phi_\delta^2}{\Lambda^2} \frac{d\Lambda}{d\delta} \quad (23)$$

С учетом рассеяния

$$P = \frac{1}{4} \frac{\Phi_\delta^2}{\sigma^2} \frac{d\Lambda}{d\delta} \quad (24)$$

Таким образом, уравнения (20) и (24) позволяют определить тяговые усилия для электромагнитов постоянного и переменного тока.

Для построения тяговых характеристик, кроме зависимостей $F_\delta = f(\delta)$ или $\Phi = f(\delta)$, необходимо иметь вспомогательные кривые: $\sigma = f(\delta)/(8)$; $\Lambda = f(\delta)$; $d\Lambda/d\delta = f(\delta)$.

Сила притяжения электромагнита может быть вычислена по формуле Максвелла:

$$P = B_\delta^2 S_\delta (2 \mu_0), \quad (25)$$

где B_δ — индукция в рабочем зазоре; S_δ - эквивалентное сечение воздушного зазора;

μ_0 - магнитная проницаемость воздуха.

Формулой (25) можно пользоваться, если индукция в воздушном зазоре распределена равномерно. При неравномерном распределении индукции воздушный зазор можно разбить на отдельные параллельные участки ΔS_δ и, принимая индукцию равномерной на каждом участке, вычислить силу притяжения как сумму сил отдельных участков. Формулой (25) можно также пользоваться, если достаточно точно определена средняя индукция.

При однородном магнитном поле

$$P = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S_\delta} \quad (26)$$

15.5 Электромагниты переменного тока

При синусоидальном переменном токе поток (рис. 57, а) изменяется по закону

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t. \quad (27)$$

Сила притяжения электромагнита в таком случае будет

$$P = \frac{\Phi_m^2 \sin^2 \omega t}{2\mu_0 S_\delta} \quad (28)$$

Обозначим

$$\frac{\Phi_m^2}{2\mu_0 S_\delta} = P_m \quad (29)$$

Тогда

$$P = P_m \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2} (1 - \cos 2\omega t), \quad (30)$$

т.е. сила притяжения P пульсирует по значению с двойной частотой сети не меняя при этом своего знака (рис. 57,б). Сила притяжения может быть представлена в виде двух составляющих: постоянной во времени $P' = P_m/2$ и изменяющейся во времени по закону косинуса переменной $P'' = \frac{P_m}{2} \cos 2\omega t$. Среднее за период значение силы P будет $P_m/2$.

15.6 Короткозамкнутый виток

Если отрывное усилие электромагнита будет $P_{отр}$, то дважды за период в точке A (рис. 57,в) якорь электромагнита будет отпадать, а в точке B — снова притягиваться, т. е. будет вибрировать с двойной частотой. Вибрация приводит к износу магнитной системы и сопровождается гудением.

Для устранения вибрации электромагниты переменного тока снабжаются короткозамкнутыми витками (рис. 58, а) из проводниковых материалов (медь, латунь), охватывающими часть полюса электромагнита (70 — 80%).

Принцип работы витка заключается в следующем. Общий поток электромагнита Φ разветвляется на поток Φ_1 , который проходит по не охваченной витком части полюса, и на поток Φ_2 , который проходит через часть, охватываемую короткозамкнутым витком. При этом в витке индуцируется ЭДС $e_{кз}$ и возникает ток $i_{кз}$, сдвинутый по отношению к $e_{кз}$, на угол γ_0 и

определяемый весьма незначительной индуктивностью витка. Для упрощения принимаем $\gamma_0 = 0$. Ток $i_{кз}$ возбуждает магнитный поток $\Phi_{кз}$, который охватывает короткозамкнутый виток и вместе с частью основного потока образует поток Φ_2 , проходящий через часть полюса, охваченную витком, и сдвинутый во времени по отношению к потоку Φ_1 на угол φ (рис. 58, б и в).

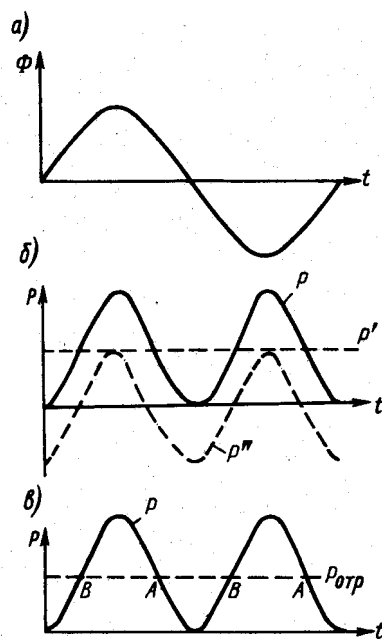


Рис. 57. Кривые изменения силы притяжения электромагнита переменного тока без короткозамкнутого витка

Сила притяжения электромагнита P складывается из двух пульсирующих, но сдвинутых во времени сил P_1 и P_2 (рис. 58, г). Благодаря сдвигу их во времени общая сила P пульсирует много меньше и минимальное значение ее остается выше $P_{отр}$, чем и исключается вибрация якоря.

Каждая из сил P_1 и P_2 может быть представлена в виде двух составляющих:

$$P_1 = \frac{P_{1m}}{2} - \frac{P_{1m}}{2} \cos 2\omega t; \quad (31)$$

$$P_2 = \frac{P_{2m}}{2} - \frac{P_{2m}}{2} \cos 2(\omega t - \varphi); \quad (32)$$

Полная сила

$$P = \frac{P_{1m}}{2} + \frac{P_{2m}}{2} \left[\frac{P_{1m}}{2} \cos 2\omega t + \frac{P_{2m}}{2} \cos (2\omega t - 2\varphi) \right]. \quad (33)$$

$$P = \frac{P_{1m}}{2} + \frac{P_{2m}}{2} - \text{постоянная составляющая};$$

$$\left[\frac{P_{1m}}{2} \cos 2\omega t + \frac{P_{2m}}{2} \cos (2\omega t - 2\varphi) \right] - \text{переменная составляющая}.$$

Амплитудное значение P_{12m} (рис 5-6, д) переменной составляющей

$$P_{12m} = \sqrt{\left(\frac{P_{1m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{P_{2m}}{2}\right)^2 + 2 \frac{P_{1m}}{2} \frac{P_{2m}}{2} \cos 2\varphi} \quad (34)$$

тогда полная сила

$$P = \frac{P_{1m}}{2} + \frac{P_{2m}}{2} - \sqrt{\left(\frac{P_{1m}}{2}\right)^2 + \left(\frac{P_{2m}}{2}\right)^2 + 2 \frac{P_{1m}}{2} \frac{P_{2m}}{2} \cos 2\varphi \cos 2\omega t} \quad (35)$$

Как видно из уравнения (35), пульсация зависит от угла сдвига φ , между потоками Φ_1 и Φ_2 . Под пульсацией силы η понимают отношение амплитудных значений переменной и постоянной составляющих:

$$\eta = \frac{P_{12m}}{(P_{1m}/2) + (P_{2m}/2)} \quad (36)$$

Пульсация будет отсутствовать при $P_{12m} = 0$. Это возможно при одновременном выполнении двух условий:

- 1) $P_{1m}/2 = P_{2m}/2$, т.е. $\Phi_1 = \Phi_2$;
- 2) $2\varphi = \pi$, т.е. угол сдвига между потоками Φ_1 и Φ_2 должен быть 90° .

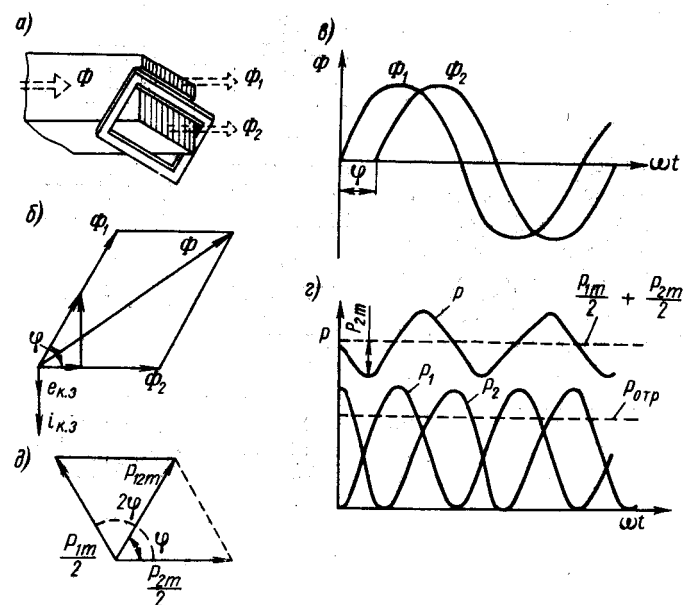


Рис. 58. Принцип работы короткозамкнутого витка в электромагнитных системах переменного тока

В системах с короткозамкнутым витком достигнуть сдвига потоков на 90° практически невозможно. В осуществляемых системах $\varphi = 50 \dots 80^\circ$. Минимальное значение пульсации получается при соблюдении первого условия.

15.7 Статические тяговые характеристики электромагнитов и механические характеристики аппаратов

Для удерживающих электромагнитов интерес представляет только сила P , создаваемая электромагнитом при неизменном (притянута) положении детали.

Для притягивающих электромагнитов нас интересует зависимость создаваемого

электромагнитом усилия от рабочего зазора $P = f(\delta)$ или зависимость момента от угла раствора якоря $M = f(\alpha)$, так как для приведения в действие того или иного аппарата необходимо преодолеть его противодействующие силы, изменяющиеся по ходу якоря у разных аппаратов по-разному. Примеры тяговых характеристик некоторых электромагнитов приведены на рис. 59.

Под механической характеристикой аппарата понимают зависимость суммарной силы сопротивления, противодействующей перемещению подвижной системы, от хода якоря. Суммарная сила сопротивления складывается из противодействующих сил отключающих и контактных пружин, веса подвижной системы и сил трения в подшипниках и шарнирах между подвижными деталями. При этом противодействующие силы пружин и веса всегда направлены в одну сторону независимо от направления перемещения якоря, силы трения меняют свое направление в зависимости от направления движения якоря. Характеристики обычно строятся: для прямоходовых подвижных систем в осях «противодействующая сила $P_{отр.}$ — рабочий зазор δ », для поворотных магнитных систем в осях «противодействующий момент $M_{отр}$ — угол поворота α », где $P_{отр}$

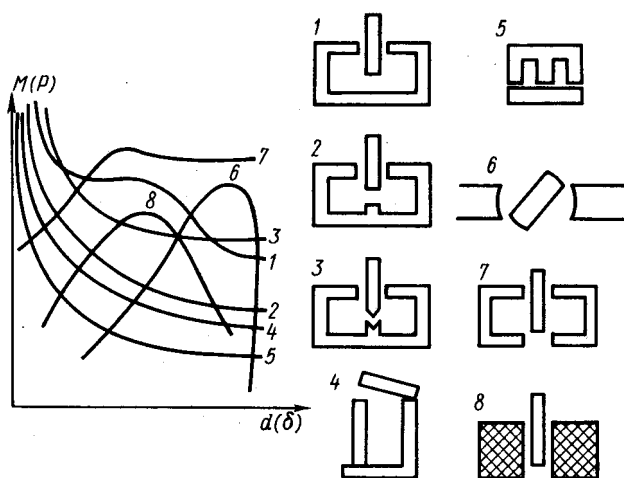


Рис. 59. Статические тяговые характеристики некоторых электромагнитных систем:
1 – 8 – формы систем и соответствующие им характеристики

и $M_{отр}$ — соответственно отрывные усилие и момент.

При включении

$$P_{отр.} = P_{пруж.} = \pm G + P_{тр} \quad (37)$$

и соответственно

$$M_{отр} = M_{пруж.} = \pm MG + M_{тр}; \quad (38)$$

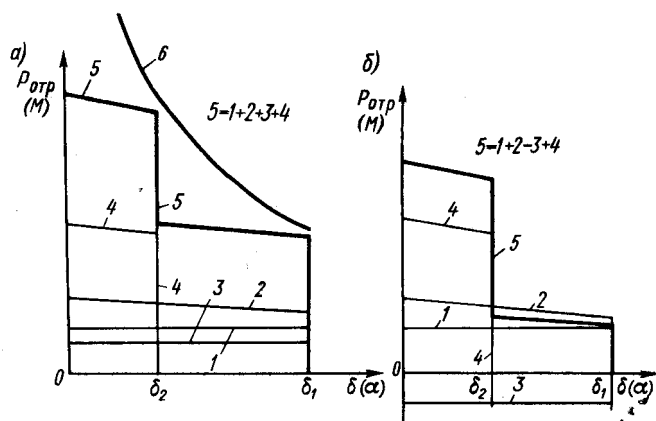


Рис. 60. Механические характеристики контактора: а – при включении; б – при отключении

при отключении

$$P_{отр.} = P_{пруж.} = \pm G - P_{тр} \quad (39)$$

и соответственно

$$M_{отр} = M_{пруж.} = \pm MG - M_{тр} \quad (40)$$

где $P_{пруж.}$ — усилия, создаваемые отключающими и контактными пружинами; G — вес подвижной системы, в зависимости от конструкции вес может противодействовать (+) или помогать (—) включению; где $P_{отр.}$ — силы трения.

В общем случае механическая характеристика представляет собой ломаную линию (рис. 60). В качестве примера рассмотрим построение механической характеристики электромагнитного контактора при включении и отключении. В точке δ_1 действуют вес подвижной системы (кривая 1), сила отключающей пружины (кривая 2) и силы трения (кривая 3). При движении якоря $P_{отр.}$ возрастает за счет дополнительного сжатия отключающей пружины. В точке δ_2 происходит соприкосновение контактов, при этом $P_{отр.}$ возрастает сначала скачкообразно за счет начального нажатия (кривая 4), а затем плавно за счет дополнительного сжатия контактных пружин. Кривая 5 представляет собой сумму кривых 1—4 и является механической характеристикой рассматриваемого аппарата.

Тяговая характеристика P (кривая б) представляет собой зависимость силы притяжения электромагнита от зазора (соответственно зависимость момента притяжения от угла поворота якоря). Движение якоря начнется, когда электромагнитная сила притяжения при $\delta = \delta_1$ станет больше противодействующей. Для обеспечения четкого и надежного включения аппарата тяговая характеристика должна лежать выше механической и соответствовать ей. В зависимости от конструкции и рода тока электромагнита могут быть получены различного рода статические тяговые характеристики.

Расположение катушки в магнитной системе относительно рабочего зазора в значительной степени определяет поток рассеяния. Таким образом, при данной МДС значение силы притяжения электромагнита также зависит от расположения катушки в магнитной системе. Большая сила притяжения получается, когда рабочий зазор расположен внутри катушки. При этом катушка должна быть смещена в сторону якоря.

16 ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА

16.1 Динамические характеристики электромагнитов

Приведенные на рис. 59 характеристики являются статическими. Они характеризуют тяговое усилие электромагнита при фиксированном положении якоря. При движении якоря изменяется индуктивность системы и динамические характеристики $P_{дин} = f(\delta)$ будут несколько отличаться от статических, сохраняя в основном свой характер.

Кривая нарастания тока в катушке при включении электромагнита. Для каждого момента времени здесь справедливо уравнение

$$U = ir + \frac{d\psi}{dt} = ir + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (41)$$

Пока ток мал (участок Oa) и тяговое усилие электромагнита меньше противодействующих усилий, якорь неподвижен. Для этого участка можно принять $L = \text{const}$, тогда $dL/dt = 0$ и

$$U = ir + L \frac{di}{dt} \quad (42)$$

Решение этого уравнения дает

$$i = \frac{U}{r} (1 - e^{-\frac{r}{L}t}) = I_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (43)$$

где $I_{уст} = U/r$ — установившееся значение тока в катушке после окончания переходного процесса, А; $T = L/r$ — постоянная времени цепи, с.

Графически постоянная времени определяется отрезком T прямой $I_{уст}$, отсекаемым касательной к кривой тока в начале координат.

Время t_1 от момента приложения напряжения до момента трогания якоря (точка a) называется *временем трогания на включение*. Оно может быть определено из уравнения

$$t_1 = \frac{L}{r} \ln \frac{k}{k-1} \quad (44)$$

где $k = I_{уст}/I_{тр}$, $I_{тр}$ — ток, соответствующий моменту трогания якоря (точка a).

Точка a соответствует моменту, когда тяговое усилие электромагнита начинает превосходить противодействующее усилие. Якорь трогается и движется до момента замыкания с сердечником (участок ab). Снижение тока в катушке при движении якоря определяется противо-ЭДС, вызванной изменением индуктивности $i \frac{dL}{dt}$ системы и возрастающей с увеличением скорости движения якоря. При малых скоростях движения якоря ток в катушке может не уменьшаться. При неподвижном якоре нарастание тока происходило бы по штриховому участку кривой.

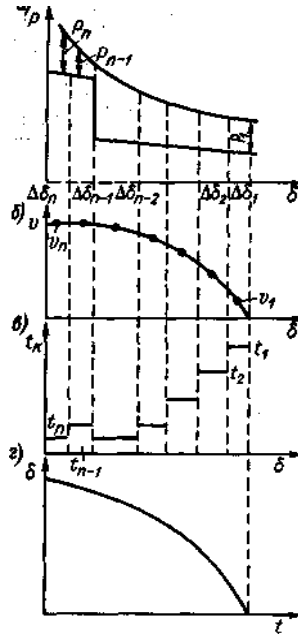


Рис. 61. Графики к решению уравнения движения подвижной системы

Точка *Б* соответствует моменту замыкания якоря и его остановке. Индуктивность системы за счет уменьшения зазора резко возрастает, но в дальнейшем изменяется мало с ростом тока. Ток в катушке нарастает до установившегося значения (участок *be*).

Время t_2 от момента трогания до момента остановки якоря называют *временем движения*, а суммарное время $t_1 + t_2 = t_{БКЛ}$ - *временем включения*.

Если принять, что силы трения не зависят от скорости движения подвижной системы, а масса m системы постоянна, то уравнение движения может быть представлено в виде

$$m \frac{dv}{dt} = P = P_{отр} = P_{из} \quad (45)$$

Или

$$m \frac{v^2 - v_0^2}{2} = \int_0^\delta P_{из} d\delta, \quad (46)$$

т.е. приращение скорости пропорционально избыточному усилию $P_{из}$, а работа всех сил на данном участке равна приращению кинетической энергии движущихся частей.

Скорость движения подвижной системы в любой точке определится из уравнения

$$v = \sqrt{\left(\frac{2}{m} \int_0^\delta P_{из} d\delta \right) + v_0^2} \quad (47)$$

16.2 Уравнение движения подвижной системы

Выразить аналитически $P = f(\delta)$ весьма трудно и не всегда возможно. Решим эту задачу графоаналитически.

Строим механическую и тяговую характеристики (рис. 61, *а*). Разбиваем путь δ , который

должен пройти якорь, на ряд участков $\Delta\delta_K \Big|_{K=n}^{K=1}$ (участки могут быть и неравной длины). Из графика определяем среднюю избыточную силу на каждом из участков и считаем ее постоянной. Тогда для первого участка средняя скорость $V_1 = \sqrt{2P_{из}\Delta\delta_1 / m + 0}$, для любого участка k

$$v_k = \sqrt{\frac{2P_{из}\Delta\delta_k}{m} + v_{k-1}^2} \quad (48)$$

Получив, таким образом, средние скорости движения для всех участков, можем построить зависимость скорости от пути $v = f(\delta)$ (рис. 61,б).

Время движения на каждом из участков определится из соотношения

$$t_k = \Delta\delta_k / v_k \quad (49)$$

и может быть представлено ломаной кривой (рис. 61,в).

Время срабатывания аппарата определится как сумма времен:

$$t_2 = \sum_{k=1}^{K=n} t_k = \sum_{k=1}^{K=n} \frac{\Delta\delta_k}{v_k} \quad (50)$$

Суммируя $\Delta\delta_k$ и соответствующие им t_k , можем построить зависимость изменения зазора во времени $\delta = f(t)$ (рис. 61, г). Если P_m мало меняется по ходу якоря и его можно принять постоянным (средним) $P_{из.ср}$, то

$$t_2 = \sqrt{\frac{m\delta}{2P_{из.ср}}} \quad (51)$$

Отключение электромагнита осуществляется путем обрыва тока в катушке. В зависимости от скорости гашения дуги на контактах выключающего аппарата ток в катушке и поток в магнитной системе будут уменьшаться по некоторой кривой. В момент времени $t = t_3$, от момента начала обрыва тока, сила притяжения станет меньше отрывного усилия и якорь электромагнита начнет отпадать. Время t_3 от начала обрыва тока в катушке до момента трогания якоря называют *временем трогания на отключение*.

Под действием отрывного усилия $P_{отр}$ якорь отойдет в разомкнутое положение. Время движения якоря t_4 определяется так же, как при включении аппарата, $P_{из}$ при этом равно $P_{отр}$ на отключение.

Время $t_3 + t_4 = t_{откл}$ называют *временем отключения*.

16.3 Замедление и ускорение действия электромагнита

В ряде случаев на практике необходимо замедлить или ускорить действие электромагнита.

Замедление действия электромагнита постоянного тока может быть достигнуто увеличением его постоянной времени, либо увеличением индуктивности самой катушки, либо последовательным включением дополнительной катушки индуктивности L (рис. 62, а). Последнее применяется редко. Включение параллельно катушке конденсатора C (рис. 62,б) также дает замедление срабатывания. При соответствующем подборе емкости нарастание напряжения на катушке происходит постепенно по мере заряда конденсатора.

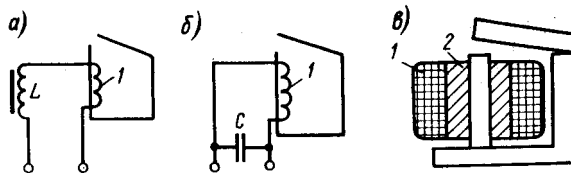


Рис. 62. Схемы замедления срабатывания электромагнита
1 — катушка; 2 — короткозамкнутая обмотка

Широко применяется замедление действия электромагнита при помощи короткозамкнутого витка, имеющего малое электрическое сопротивление (рис. 62, в). Короткозамкнутый виток (обмотка) замедляет нарастание потока при включении электромагнита и в гораздо большей степени его уменьшение при отключении электромагнита.

При отсутствии короткозамкнутого витка нарастание тока в катушке происходило бы по кривой 1 (рис. 63, а), а потока и тяговой силы — по кривой 4. В момент времени $t = t_1$ тяговое усилие достигло бы значения силы трогания $P_{ТР} = P_{ОТР}$ и якорь начал бы двигаться. При наличии короткозамкнутого витка ток в катушке будет изменяться по кривой 2, а индуцированный в витке ток — по кривой 3. Ток в витке направлен встречно току в катушке. Поток в системе обусловлен разностью токов в катушке и короткозамкнутом витке и будет нарастать по кривой 5. Поток и тяговое усилие достигнут соответственно замедленно на время Δt , которое носит название *выдержки времени на включение*.

При отключении катушки и отсутствии короткозамкнутого витка ток в катушке спадал бы по кривой 1, а поток и тяговое усилие — по кривой 4 (рис. 63, б). Время трогания было бы t_3 . При наличии короткозамкнутого витка ток в катушке будет уменьшаться по кривой 2, а индуцированный в короткозамкнутом витке ток будет изменяться по кривой 3, т. е. система стремится препятствовать

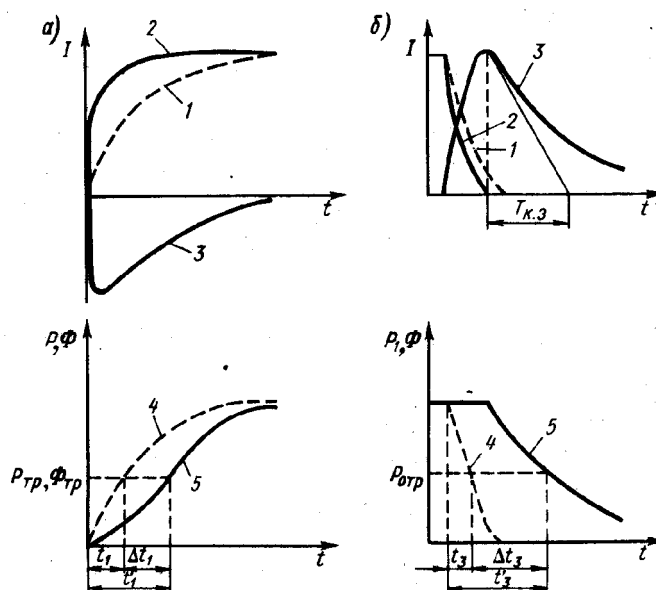


Рис. 63. К пояснению принципа работы электромагнита постоянного тока с короткозамкнутым ВИТКОМ

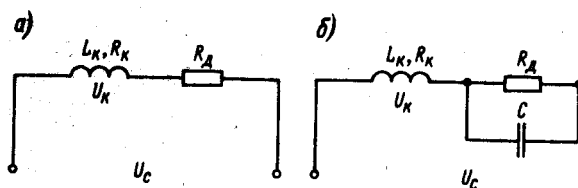


Рис. 64. Схема ускорения срабатывания электромагнитов постоянного тока

Поток и тяговое усилие будут спадать гораздо медленнее (кривая 5), чем при отсутствии витка. Значения $P_{отр}$ тяговое усилие достигнет через время $t'_3 > t_3$. Время $\Delta t_3 = t'_3 - t_3$ называют *выдержкой времени на отключение*. Спадание тока в короткозамкнутом витке следует закону

$$i = I_0 e^{-t/T_{кз}} \quad (52)$$

где I_0 — максимальное значение индуцированного тока в короткозамкнутом витке в момент отключения; $T_{кз} = L_{кз}/R_{кз}$ — постоянная времени короткозамкнутого витка; t — время. Таким образом, чем больше постоянная времени короткозамкнутого витка, тем медленнее будет спадать в нем ток и тем большую выдержку времени он создаст.

Ускорение действия электромагнита может быть получено за счет уменьшения его постоянной времени. В этом случае наличие короткозамкнутого витка (обмотки), массивных частей магнитопровода, металлических каркасов катушки и всяких короткозамкнутых витков, образованных из крепежных и прочих деталей, лежащих на пути потока, является недопустимым, так как они будут увеличивать время действия электромагнита. Шихтованный магнитопровод также приводит к ускорению действия электромагнита.

Включение последовательно с катушкой дополнительного активного сопротивления R_a (рис. 64, а) приводит к уменьшению постоянной времени всей цепи и ускорению действия электромагнита. При этом катушка должна быть рассчитана только на часть напряжения сети:

$$U_K = U_C \frac{R_K}{R_K + R_D} \quad (53)$$

Энергия $I^2 R_D$ теряется в этой схеме бесполезно.

Еще большее ускорение может быть получено при включении электромагнита по схеме рис. 64, б. В момент включения конденсатор представляет собой очень маленькое сопротивление. Сопротивление

R_D оказывается как бы шунтированным. Почти все напряжение сети оказывается приложенным к катушке, рассчитанной только на часть напряжения. Ток в катушке электромагнита быстро нарастает, и включение электромагнита ускоряется. Когда конденсатор зарядится, ток в цепи будет определяться суммарным сопротивлением $R_K + R_D$, как в схеме на рис. 64, а.

16.4 Тормозные устройства, физические явления в электрических аппаратах

При остановке подвижной системы аппарата запасенная кинетическая энергия переходит в удар, воспринимаемый сердечником электромагнита (при замыкании), упором (при размыкании) либо какими-то другими деталями. Эти удары приводят к усиленному износу контактов (вследствиедребезга), магнитной системы, всех деталей подвижной системы. В итоге происходит нарушение работы и разрушение всего аппарата.

Для смягчения удара и его вредных последствий многие электрические аппараты снабжаются тормозными устройствами. Задачей этих устройств является принять на себя удар и погасить всю запасенную кинетическую энергию подвижной системы или часть ее.

Различают три вида тормозных устройств: эластичные, буферные и успокоительные.

Эластичные устройства применяются в аппаратах, имеющих небольшой запас кинетической энергии. Они выполняются в виде эластичных упоров из кожи, картона, твердой резины и других материалов.

В мощных аппаратах применяются *буферные устройства*, преимущественно гидравлические. Тормозное усилие в них создается за счет сопротивления вытеканию жидкости через малые отверстия.

Успокоительные устройства применяются главным образом в реле. Они предназначены не только для поглощения энергии удара, но и для замедления действия аппарата.

При наличии тормозных устройств (P_T) уравнение (5-45) на участке торможения примет вид

$$m \frac{dv}{dt} = P_{ТЯГ} - P_{ОТР} - P_T = P_{ИЗ} - P_T \quad (54)$$

Если сила торможения постоянна, получим

$$v = v_0 - \frac{P_T - P_{ИЗ}}{m} t \quad (55)$$

где v_0 — скорость подвижных частей в момент начала действия тормоза $t = 0$, а t — время от начала действия тормоза, Путь, пройденный с начала торможения,

$$\delta = \int_0^t v dt = v_0 t - \frac{P_T - P_{ИЗ}}{2m} t^2 \quad (56)$$

Время от момента начала действия тормоза до полной остановки подвижной системы t_T , определится из уравнения (55), если положить $v = 0$:

$$t_T = \frac{v_0 m}{P_T - P_{ИЗ}} \quad (57)$$

Из уравнения (57) следует, что для остановки подвижных частей тормозным устройством сила торможения P_m должна быть больше разности сил, определяемых тяговой и механической характеристиками. И аналогично при выключении, когда тяговое усилие отсутствует, сила торможения должна превышать силу, определяемую механической характеристикой.

16.5 Поляризованные электромагнитные системы

Поляризованные электромагнитные системы отличаются от рассмотренных выше наличием двух не зависящих друг от друга магнитных потоков: *постоянного*, не зависящего от состояния схемы, в которую включен механизм, и *переменного*, зависящего от состояния схемы, в которую включен механизм. Первый, полярирующий, поток $\Phi_{п}$ создается либо постоянным магнитом (рис. 65, а), либо электромагнитом с независимым питанием. Второй, рабочий, поток $\Phi_{э}$ создается электромагнитом. Значение и направление рабочего потока зависят от состояния схемы, в которую включен механизм.

Принцип действия. Образованный магнитом 3 полярирующий поток $\Phi_{п}$, пройдя через якорь 2, разветвляется. Одна его часть $\Phi_{п1}$ проходит через зазор δ_1 и левую часть сердечника 1. Вторая его часть $\Phi_{п2}$ проходит через зазор δ_2 и правую часть сердечника. Катушками 4 и 4', надетыми на сердечник и включенными согласно, создается рабочий поток. Основная его часть $\Phi_{э}$ замыкается через весь воздушный зазор $\delta_1 + \delta_2$ и сердечник, охватывая обе катушки. Меньшие части этого потока Φ_4 и Φ'_4 замыкаются через якорь, соответствующий воздушный зазор и часть сердечника, охватывая только одну катушку.

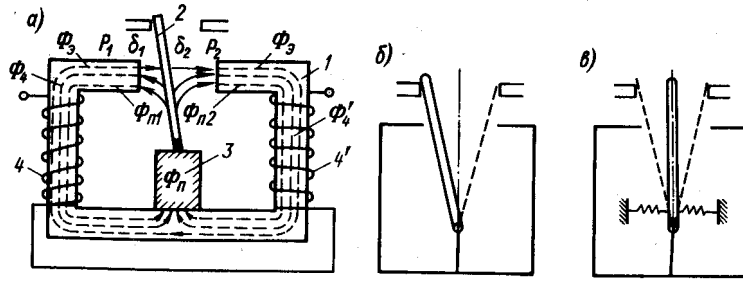


Рис. 65. Принцип устройства поляризованной магнитной системы

При наличии только одного поляризующего потока якорь отклонится к одному из полюсов магнита, так как с уменьшением зазора (в нашем примере δ_1) часть поляризующего потока в этом зазоре увеличится за счет уменьшения его доли в другом зазоре. При появлении рабочего потока в одном из зазоров будем иметь разность потоков, а в другом — сумму. В нашем примере в зазоре δ_1 — поток $\Phi_{п1} - \Phi_3 - \Phi_4$, в зазоре δ_2 — поток $\Phi_{п2} + \Phi_3 + \Phi_4$. По мере увеличения рабочего потока поток в зазоре δ_1 будет все уменьшаться, а в зазоре δ_2 — увеличиваться. При каком-то соотношении потоков якорь перекинется на правую сторону, т. е. система сработает.

Для возврата системы в исходное положение нужно изменить полярность тока (а, следовательно, и потока) в рабочих катушках. Можно настроить систему так, что якорь вернется в исходное положение при снижении рабочего потока и сохранении его полярности. Для этого необходимо, чтобы, перекинувшись вправо, якорь не переходил через нейтральное положение (рис. 65, б), т. е. чтобы при любом положении якоря один и тот же воздушный зазор оставался меньше другого (например, $\delta_1 < \delta_2$). Такая настройка называется *настройкой на преобладание*. В магнитной системе (рис. 65, в) якорь в зависимости от полярности тока в рабочей катушке может отклоняться в ту или другую сторону. При обесточенной катушке якорь вернется в нейтральное положение.

Расчет тяговых сил. Считаем, что индукция распределена в зазорах равномерно, и расчет будем вести, используя формулу Максвелла. Силы, действующие на якорь в зазорах δ_1 и δ_2 от всех потоков, обозначим соответственно P_1 и P_2 .

При наличии только поляризующего потока

$$P_1 = \frac{\Phi_{п1}^2}{2\mu_0 S_\delta}; P_2 = \frac{\Phi_{п2}^2}{2\mu_0 S_\delta}. \quad (58)$$

Суммарная сила, действующая на якорь

$$P = P_1 - P_2 = \frac{\Phi_{п1}^2 - \Phi_{п2}^2}{2\mu_0 S_\delta}. \quad (59)$$

Учитывая, что $\Phi_{п1} + \Phi_{п2} = \Phi_{п}$ можем написать

$$\frac{\Phi_{п1}}{\Phi_{п2}} = \frac{\delta_1}{\delta_2}; \Phi_{п1} = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \Phi_{п}; \Phi_{п2} = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \Phi_{п} \quad (60)$$

Тогда

$$P = P_1 - P_2 = \frac{\Phi_{п}^2 (\delta_2 - \delta_1)}{2\mu_0 S_\delta (\delta_1 + \delta_2)} \quad (61)$$

т. е. суммарная сила, действующая на якорь, пропорциональна смещению якоря от нейтральной

$[(\delta_2 - \delta_1)/2 - \text{смещение}]$ и зависит от потока постоянного магнита.

При наличии рабочего потока

$$P_1 = \frac{(\Phi_{\Pi 1} - \Phi_4 - \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}}; P_2 = \frac{(\Phi_{\Pi 2} - \Phi'_4 - \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}}. \quad (62)$$

Потоками Φ_4 и Φ'_4 можем пренебречь, так как постоянный магнит представляет для них большое сопротивление и они малы по сравнению с другими потоками. Тогда

$$P_1 = \frac{(\Phi_{\Pi 1} - \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}}; P_2 = \frac{(\Phi_{\Pi 2} + \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}} \quad (63)$$

Нас интересует значение потока Φ_{Θ} , при котором якорь начнет перемещаться. Это будет при условии, когда $P_1 = P_2$, т. е.

$$\frac{(\Phi_{\Pi 1} - \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}} = \frac{(\Phi_{\Pi 2} + \Phi_{\Theta})^2}{2\mu_0 S_{\delta}} \quad (64)$$

Откуда

$$\Phi_{\Theta} = \frac{1}{2} (\Phi_{\Pi 1} - \Phi_{\Pi 2}). \quad (65)$$

Если пренебречь потерями в стали сердечника и потоками рассеяния, то минимальная МДС F_{\min} , при которой якорь придет в движение, будет

$$F_{\Theta \min} = \frac{\Phi_{\Theta}}{\Lambda} = \frac{1}{2} \frac{(\Phi_{\Pi 1} - \Phi_{\Pi 2})(\delta_1 + \delta_2)}{S_{\delta} \mu_0} \quad (66)$$

Подставляя значения $\Phi_{\Pi 1}$ и $\Phi_{\Pi 2}$ согласно выражению (8-3)_v получим

$$F_{\Theta \min} = \Phi_{\Pi} \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{2\mu_0 S_{\delta}} \quad (67)$$

т. е. минимальная МДС рабочих катушек, необходимая для срабатывания системы, пропорциональна поляризующему потоку и смещению якоря от нейтрали.

Формы магнитных систем. По источнику МДС поляризующего поля различают систему с постоянным магнитом и системы с электромагнитом, питаемым от независимого источника.

По конструкции различают системы с последовательной магнитной цепью, с параллельной, или дифференциальной, магнитной цепью и с мостовой магнитной цепью. В мостовой магнитной цепи якорь остается в нейтральном положении при отсутствии тока в рабочих обмотках.

Область применения. Поляризованные системы находят широкое применение в установках проводной связи, а также в устройствах электросиловой автоматики, релейной защиты, в следящих системах, системах телеуправления, железнодорожной сигнализации и блокировки. Особенности этих систем являются направленность действия, высокая чувствительность, большая кратность термической стойкости, быстроедействие.

17 ПРЕДОХРАНИТЕЛИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

17.1 Назначение, принцип действия и устройство предохранителя

Назначение предохранителя. Предохранители появились одновременно с электрическими сетями. Простота устройства и обслуживания, малые размеры, высокая отключающая способность, небольшая стоимость обеспечили их очень широкое применение. Предохранители НН изготавливаются на токи от мА до тысяч А и на напряжение до 660 В, а предохранители ВН - до 35 кВ и выше.

Предохранители - это ЭА, предназначенные для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов КЗ.

Отключение защищаемой цепи происходит посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение.

В большей части конструкций отключение цепи осуществляется путем расплавления плавкой вставки, которая нагревается непосредственно током цепи. После отключения цепи необходимо заменить перегоревшую вставку на исправную. Эта операция осуществляется вручную или автоматически. В последнем случае заменяется весь предохранитель.

Широкое применение предохранителей в самых различных областях народного хозяйства и в быту привело к многообразию их конструкций. Однако, несмотря на это, все они имеют следующие основные элементы: корпус или несущую деталь, плавкую вставку, контактное присоединительное устройство, дугогасительное устройство или дугогасительную среду.

Принцип работы предохранителя, физические явления в электрическом аппарате. Отключение защищаемой цепи происходит посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определённое значение.

В большей части конструкций отключение цепи осуществляется путём расплавления плавкой вставки, которая нагревается непосредственно током защищаемой цепи. После отключения цепи необходимо заменить перегоревшую вставку на исправную. Эта операция осуществляется вручную либо автоматически. В последнем случае заменяется весь предохранитель.

При токах $> I$ плавления предохранитель должен срабатывать в соответствии с времятоковой характеристикой. Сростом тока степень ускорения перегорания плавкой вставки должна возрастать намного быстрее тока. Для получения такой характеристики придают вставке определенную форму или используют металлургический эффект.

Вставку выполняют в виде пластинки с вырезами (рис. 66,а), уменьшающими ее сечение на отдельных участках. На этих суженных участках выделяется больше теплоты, чем на широких. При $I_{ном}$ избыточная теплота вследствие теплопроводности материала вставки успевает распределяться к более широким частям и вся вставка имеет практически одну температуру. При перегрузках ($I \approx I \propto \max$) нагрев суженных участков идет быстрее, т.к. только часть теплоты успевает отводиться к широким участкам. Плавкая вставка плавится в одном самом горячем месте (рис 66,б). При КЗ ($I \gg I \propto \max$) нагрев суженных участков идет настолько интенсивно, что практически отводом теплоты от них можно пренебречь. Плавкая вставка перегорает одновременно во всех или нескольких суженных местах (рис 66,в).

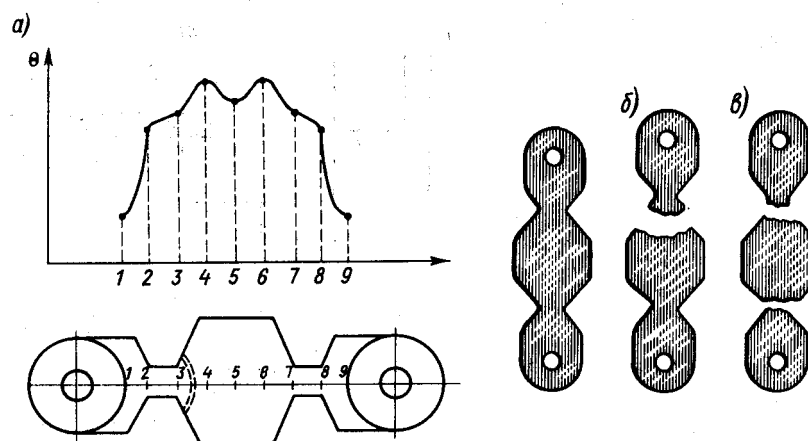


Рис. 66 – Распределение температур (а) и места перегорания фигурных плавких вставок при перегрузках (б) и при КЗ (в)

Во многих конструкциях вставке 1 придается такая форма (рис 67,а) , при которой электродинамические силы F , возникающие при токах КЗ , разрывают вставку еще до того, как она успевает расплавиться. На рис. 67,а место разрыва обозначено кружком. Этот участок выполняется меньшего сечения.

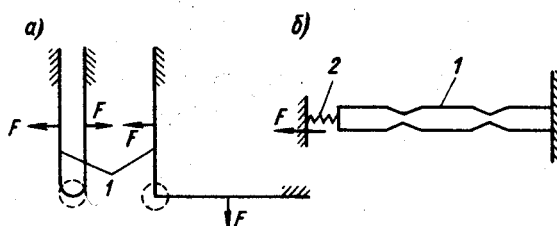


Рис. 67. Примеры форм плавких вставок с ускоренным их разрывом

При токах перегрузки электродинамические силы малы и плавкая вставка плавится в суженном месте. В конструкции на рис. 67,б ускорение отключения цепи при перегрузках и КЗ достигается за счет пружины 2, разрывающей вставку 1 при размягчении металла на суженных участках, до того, как происходит плавление этих участков.

Металлургический эффект заключается в том, что многие легкоплавкие металлы (олово, свинец и др.) способны в расплавленном состоянии растворять другие тугоплавкие металлы (медь, серебро и др.). Это явление используется в предохранителях с вставками из ряда параллельных проволок.

Для ускорения плавления вставок при перегрузках на проволоки напаиваются оловянные шарики. При токах перегрузки шарик расплавляется и растворяет часть металла, на котором он напаян. Вставка перегорает в месте напайки шарика.

17.2 Параметры предохранителя

Предохранитель работает в двух резко различных режимах: в нормальных условиях и условиях перегрузок и КЗ. В первом случае перегрев вставки имеет характер установившегося процесса, при котором вся выделяемая в ней теплота отдается в окружающую среду. При этом кроме вставки нагреваются до установившейся температуры все другие детали предохранителя. Эта температура не должна превышать допустимых значений. Ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы, называют *номинальным током плавкой вставки* $I_{ном}$. Он может быть отличен от номинального тока самого предохранителя.

Обычно в один и тот же предохранитель можно вставлять плавкие вставки на разные номинальные токи. *Номинальный ток предохранителя*, указанный на нем, равен наибольшему

из токов плавких вставок, предназначенных для данной конструкции предохранителя.

Защитные свойства предохранителя при перегрузках нормируются. Для предохранителей обычного быстрого действия задаются *условный ток не плавления* - ток, при протекании которого в течении определенного времени плавкая вставка не должна перегореть, *условный ток плавления* - ток, при протекании которого в течении определенного времени плавкая вставка должна перегореть. Например, для предохранителя с плавкими вставками на номинальные токи 63 -100 А плавкие вставки не должны перегореть при протекании тока $1,3 I_{ном}$ в течении одного часа, а при токе $1,6 I_{ном}$ должны перегореть за время до одного часа.

Рассмотрим нагрев вставки при длительной нагрузке.

Основной характеристикой предохранителя является *времятоковая характеристика*, представляющая собой зависимость времени плавления вставки от протекающего тока $t=f(i)$. Для совершенной защиты желательно, чтобы времятоковая характеристика предохранителя (кривая 1 на рис. 68) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемой цепи или объекта (кривая 2 на рис. 68). Однако реальная характеристика предохранителя (кривая 3) пересекает кривую 2. Поясним это. Если характеристика предохранителя соответствует кривой 1, то он будет перегорать из-за старения или при пуске двигателя. Цепь будет отключаться при отсутствии недопустимых перегрузок. Поэтому ток плавления вставки выбирается больше номинального тока нагрузки. При этом кривые 2 и 3 пересекаются. В области больших перегрузок (область Б) предохранитель защищает объект. В области А предохранитель объект не защищает. При небольших перегрузках ($1,5 - 2$) $I_{ном}$ нагрев предохранителя протекает медленно. Большая часть тепла отдается окружающей среде.

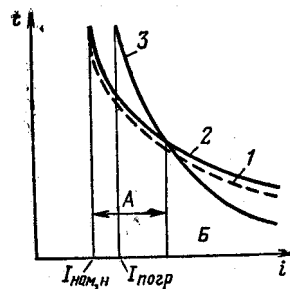


Рис. 68. Согласование характеристик предохранителя и защищаемого объекта

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении ею установившейся температуры, называется *пограничным током* $I_{погр}$. Для того, чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе $I_{ном}$, необходимо $I_{погр} > I_{ном}$. С другой стороны, для лучшей защиты значение $I_{погр}$ должно быть возможно ближе к номинальному.

Для снижения температуры плавления вставки при ее изготовлении применяются легкоплавкие металлы и сплавы (медь, серебро, цинк, свинец, алюминий).

Рассмотрим нагрев вставки при КЗ.

Если ток, проходящий через вставку, в 3 - 4 раза больше $I_{ном}$, то практически процесс нагрева идет адиабатически, т.е. все тепло, выделяемое вставкой, идет на ее нагрев.

Время нагрева вставки до температуры плавления

$$t_{пл} = A' \frac{q^2}{I_K^2} = A' j_K^2,$$

где A' - постоянная, определяемая свойствами материала; q - поперечное сечение вставки; j_K - плотность тока вставки.

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

$$t_{\text{ПЕРЕХ}} = \frac{\gamma L}{\rho_2 - \rho_1} \left(\ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{q^2}{I_K^2} = A'' \frac{q^2}{I_K^2},$$

где ρ_1 - удельное сопротивление материала вставки при температуре плавления; ρ_2 - удельное сопротивление материала вставки в жидком состоянии; γ - плотность материала вставки; L - скрытая теплота плавления материала вставки.

Основным параметром предохранителя при КЗ является *предельный ток отключения* - ток, который он может отключить при возвращающемся напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению.

Время существования дуги зависит от конструкции предохранителя. Полное время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{пл}} + t_{\text{перех}} + t_{\text{дуги}}$$

Для предохранителя со вставкой, находящейся в воздухе

$$t_{\text{пр}} = \left(A' + \frac{A''}{n} \right) \frac{q^2}{I_K^2} k_0,$$

где коэффициент $n \approx 3$ учитывает преждевременное разрушение вставки, а $k_0 = 1.2 - 1.3$ учитывает длительности горения дуги.

В предохранителях с наполнителем (закрытого типа) разрушение вставки до полного ее плавления менее вероятно. Время отключения цепи предохранителем

$$t_{\text{пр}} = (A' + A'') \frac{q^2}{I_K^2} + t_d \approx (A' + A'') \frac{q^2}{I_K^2} k_d.$$

Коэффициент $k_d = 1,7 - 2$ учитывает длительность горения дуги.

Плавление вставки переменного сечения происходит в перешейках с наименьшим сечением. Процесс нагрева протекает так быстро, что тепло почти не успевает отводиться на участки повышенного сечения. Наличие перешейков уменьшенного сечения позволяет резко снизить время с момента начала КЗ до появления дуги. Процесс гашения дуги начинается до момента достижения током КЗ установившегося или даже амплитудного значения. Дуга образуется через время t_1 после начала КЗ, когда ток в цепи значительно меньше установившегося значения $I_{K \text{ уст}}$.

Средства дугогашения позволяют погасить дугу за миллисекунды. При этом проявляется эффект токоограничения, показанный на рис. При отключении поврежденной цепи с токоограничением облегчается гашение дуги, т. к. Отключается не установившийся ток КЗ, а ток, определяемый временем плавления вставки.

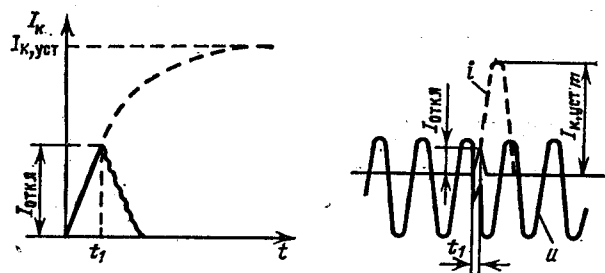


Рис. 69. Отключение постоянного и переменного тока предохранителем с токоограничением

17.3 Конструкция предохранителей

Устройство предохранителя. Широкое применение предохранителей в самых различных областях народного хозяйства и в быту привело к многообразию их конструкций. Однако, несмотря на это, все они имеют следующие основные элементы: корпус или несущую деталь, плавкую вставку, контактное присоединительное устройство, дугогасительное устройство или дугогасительную среду.

17.4 Предохранители с гашением дуги в закрытом объёме

К ним относятся предохранители со сменными плавкими вставками общего назначения без наполнителя серии ПР-2. Такие предохранители изготавливаются на напряжение до 500 В и токи до 1000 А. Гашение дуги у них происходит за счет высокого давления (до 10 МПа и более), возникающего вследствие газогенерации из стенок трубок при высокой температуре электрической дуги.

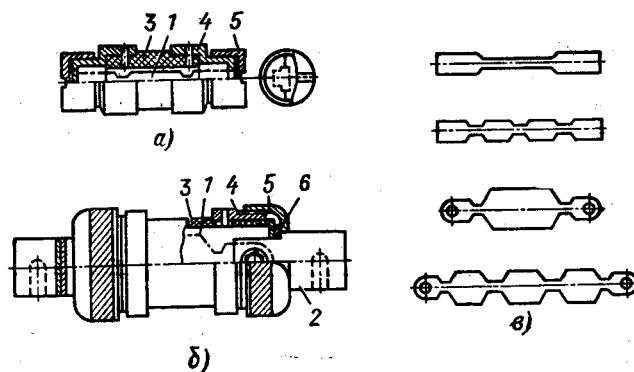


Рис. 70. Предохранитель типа ПР-2

Вставка располагается в герметичном трубчатом патроне и может иметь от одного до четырех сужений в зависимости от $I_{ном}$. Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при КЗ и создают эффект токоограничения. Время гашения дуги 0,002 с.

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

17.5 Предохранители с мелкозернистым наполнителем (серии ПН-2, ПРС)

Предохранители серии ПН-2 предназначены для защиты силовых цепей до 500 В переменного тока и 440 В постоянного тока. Они выполняются на номинальные токи 100, 250, 400 и 630 А, обладают токоограничивающим действием и высокой разрывной способностью.

Корпус 1 квадратного сечения изготавливается из фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки 2,3 и наполнитель - кварцевый песок 3. Вставки привариваются к диску 4, который крепится к пластинам 5, связанным с ножевыми контактами 9. Для получения токоограничения вставка имеет суженное сечение 8. Для снижения температуры плавления на вставку наносится оловянные полосы 7.

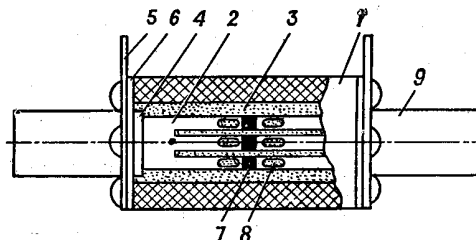


Рис. 71. Предохранитель ПН 2:

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

При КЗ 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. Градиент напряжения на дуге очень высок и достигает $(2-6)10^4$ В/м. Этим обеспечивается гашение дуги за несколько миллисекунд.

В малогабаритных распределительных устройствах применяются резьбовые предохранители типа ПРС. Они выпускаются на токи до 100 А, напряжение до 440 В постоянного тока и до 500 В переменного тока. Предельно отключаемый ток 60 кА.

Эти предохранители сложны в производстве и более дороги, чем предохранители ПН 2.

17.6 Предохранители с жидкометаллическим контактом

Предельно отключаемый ток достигает 250 кА при напряжении 450 В переменного тока. Предохранители работают многократно с большим токоограничением.

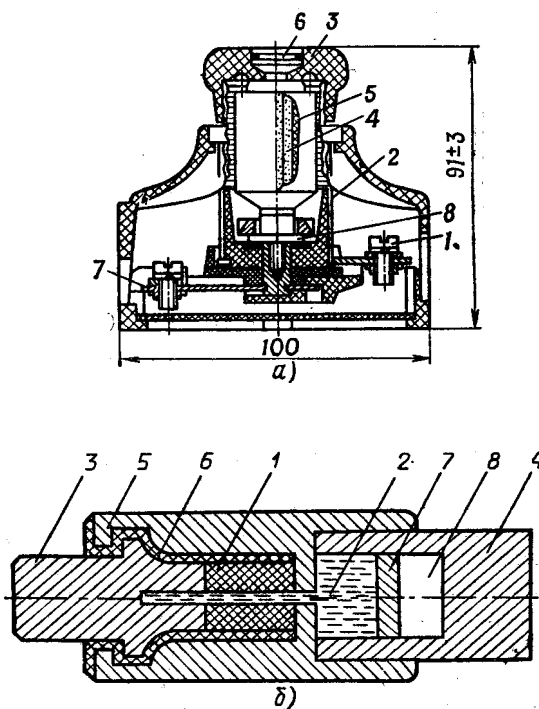


Рис. 72. Жидкометаллический предохранитель

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

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.

17.7 Быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых приборов

Предохранители выпускаются на напряжение до 2000 В и токи 2000-5000 А. Предназначены только от защиты от КЗ. Защита от токовых перегрузок должна выполняться другими аппаратами.

Основными характеристиками быстродействующих предохранителей являются наибольшие интегралы Джоуля отключения, наибольший пропускаемый ток и преддуговое время.

Интеграл Джоуля $G = \int_0^t i^2 dt$, где t – длительность протекания тока через прибор. Для эффективной защиты необходимо, чтобы джоулев интеграл предохранителя был меньше джоулевого интеграла защищаемого объекта. Для достижения этой цели вставка выполняется из серебра, имеет перешеек с минимальным сечением и охлаждается кварцевым наполнителем. Схемы вставок показаны на рис. 73.

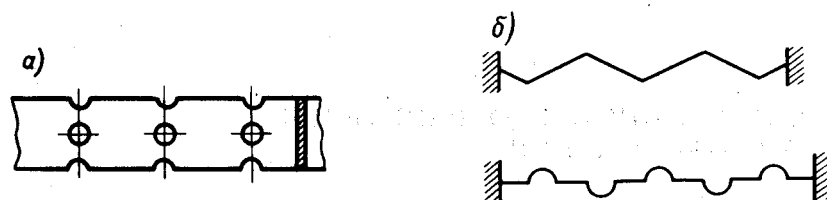


Рис. 73. Схемы форм плавких вставок быстродействующих предохранителей: а – плавкие вставки выполнены с перешейками; б – элементы выполнены с изгибами.

17.8 Предохранитель-выключатель

Предохранитель-выключатель — аппарат (блок), выполненный как рубильник, в котором в качестве подвижных контактов (ножей) применены предохранители. Таким образом, он одновременно предназначен для неавтоматической коммутации силовых электрических цепей в устройствах распределения электрической энергии, а также для защиты этих цепей при токах перегрузки и короткого замыкания. Используется на напряжение до 380 В частотой 50 Гц с номинальными токами до 400 А и отключающей способностью в соответствии с примененным предохранителем.

Аппарат состоит из несущей конструкции, неподвижных контактов, подвижных контактов-предохранителей, ручного привода с системой рычагов. Привод обеспечивает необходимое перемещение патронов предохранителей из положения «Отключено» в положение «Включено» и обратно. В закрытом исполнении имеется блокировка, исключающая открывание дверцы (кожуха) при включенном положении аппарата и включение аппарата при открытой дверце.

17.9 Выбор, применение и эксплуатация предохранителя для защиты электродвигателя и полупроводниковых устройств

Защита двигателя. 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

$$I_{в.ном} = 0,4 I_{п},$$

где $I_{п}$ – 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

$$I_{в.ном} = (0,5 - 0,6) I_{п}.$$

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

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

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

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

$$I_{в.ном} = (1 - 1,25) I_{ном.дв.} .$$

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

$$I_{к}/I_{в.ном} \geq 3 - 4,$$

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

Зачение $I_{к}$ зависит от активного и реактивного сопротивления источника питания (трансформатора) и питающих линий.

Для двухфазного КЗ:

$$I_{к(2)} = \frac{U_{ном}}{2Z_{\phi}};$$

для однофазного КЗ:

$$I_{к(1)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\phi 0}};$$

для трёхфазного КЗ:

$$I_{к(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\phi}}.$$

Сопротивления фаз Z_{ϕ} и $Z_{\phi 0}$ определяются уравнениями

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

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

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

Выбор быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых приборов. На рис. 74. представлена схема мощной выпрямительной установки. В каждом плече моста установлено по пять диодов, каждый из которых защищён предохранителем FU . При пробое диода VD_k ток I_k , обозначенный пунктиром, замыкается через VD_k в обратном направлении и закорачивает две фазы. Предохранитель FU срабатывает, повреждённый диод отключается, и схема продолжает нормальную работу с некоторой перегрузкой диодов.

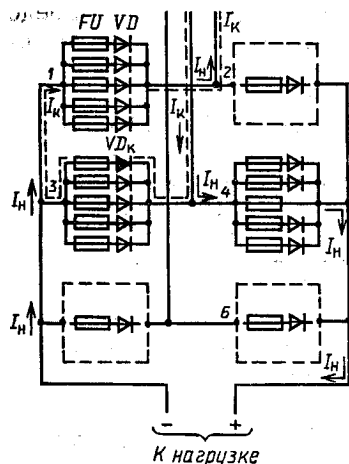


Рис. 74. Схема защиты полупроводниковых диодов в мощной выпрямительной установке

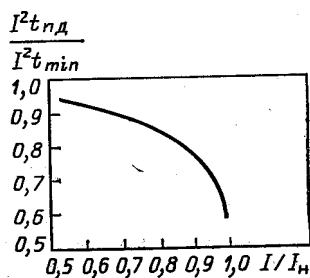


Рис. 75. Зависимость преддуговых интегралов от тока предварительной нагрузки

Полный джоулев интеграл при отключении предохранителя $(I^2 t)_{\text{откл. пред.}}$ должен быть меньше допустимого джоулевого интеграла полупроводникового прибора $(I^2 t)_{\text{приб.}}$. Для защиты диодов должно соблюдаться условие

$$(I^2 t)_{\text{откл. пред.}} \leq [n(1 - c) + c]^2 (I^2 t)_{\text{приб.}}$$

где n – число параллельных ветвей преобразователя; c – коэффициент неравномерности деления тока по ветвям. При равномерном распределении тока $c = 0$ и $(I^2 t)_{\text{откл. пред.}} \leq [n]^2 (I^2 t)_{\text{приб.}}$. Значение $(I^2 t)_{\text{приб.}}$ для прибора берётся из каталога или (при синусоидальном токе) по уравнению

$$(I^2 t)_{\text{приб.}} = I_m^2 T/4,$$

где I_m – допустимое значение ударного неповторяющегося тока в прямом направлении; T – период переменного тока.

18 АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

18.1 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 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*.

Общая продолжительность КЗ $t_{КЗ}$ (рис 76.а и б) складывается из трех слагаемых:

t_O - времени от начала КЗ до момента, когда ток достигнет значения $I_{уст}$, при котором в стационарном режиме срабатывает отключающее устройство;

$t_{откл}$ - собственное время отключения - время от момента достижения током значения тока уставки до момента расхождения контактов;

t_g - длительность процесса дугогашения.

Время t_O зависит в основном от постоянных цепи. Время $t_{откл}$ определяет быстродействие выключателя.

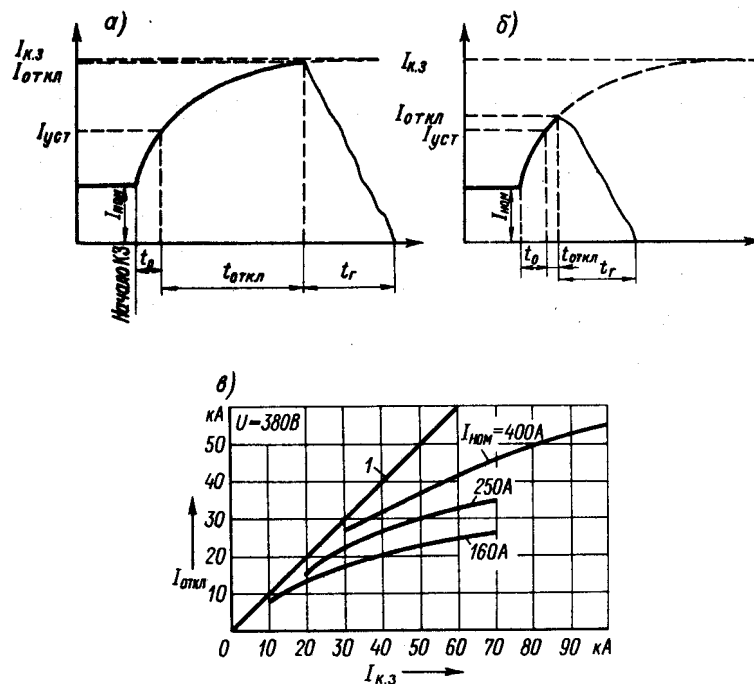


Рис. 76. Процесс отключения при КЗ: а - нетокоограничивающим выключателем; б, в - токоограничивающим выключателем

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 (рис 76,а).

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 **КЗ** (рис. 77), превосходящем ток уставки $I_{уст}$ 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.

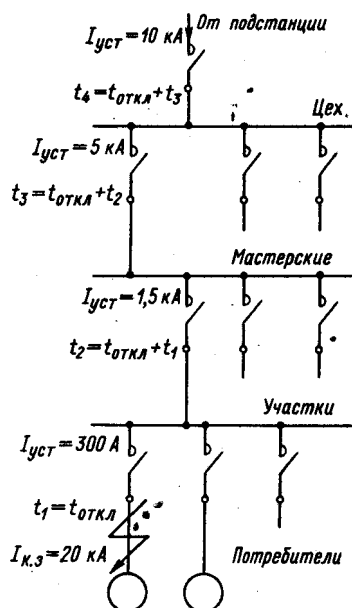


Рис. 77. Схема селективной защиты

В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся на:

- 1) *максимальные автоматы по току,*
- 2) *минимальные автоматы по напряжению,*
- 3) *автоматы обратного тока,*
- 4) *максимальные автоматы, работающие по производной тока,*
- 5) *поляризованные максимальные автоматы (отключают цепь при нарастании тока в одном прямом направлении),*
- 6) *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 : максимальный защиты по току и минимальной по напряжению .

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

электрифицированного транспорта.

18.2 Требования, предъявляемые к автоматам

К автоматам предъявляются следующие требования .

1. Токоведущая цепь автомата должна пропускать ток $I_{ном}$ в течении 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.

18.3 Узлы автомата и принцип его действия, физические явления в электрическом аппарате

В любом автомате есть следующие основные узлы: токоведущая цепь, дугогасительная камера, привод автомата, механизм автомата, механизм свободного расцепления автомата и элементы защиты расцепителей.

В автомате на ток >200 А (рис. 78) токоведущая цепь имеет главные 1 и дугогасительные контакты 3. 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.

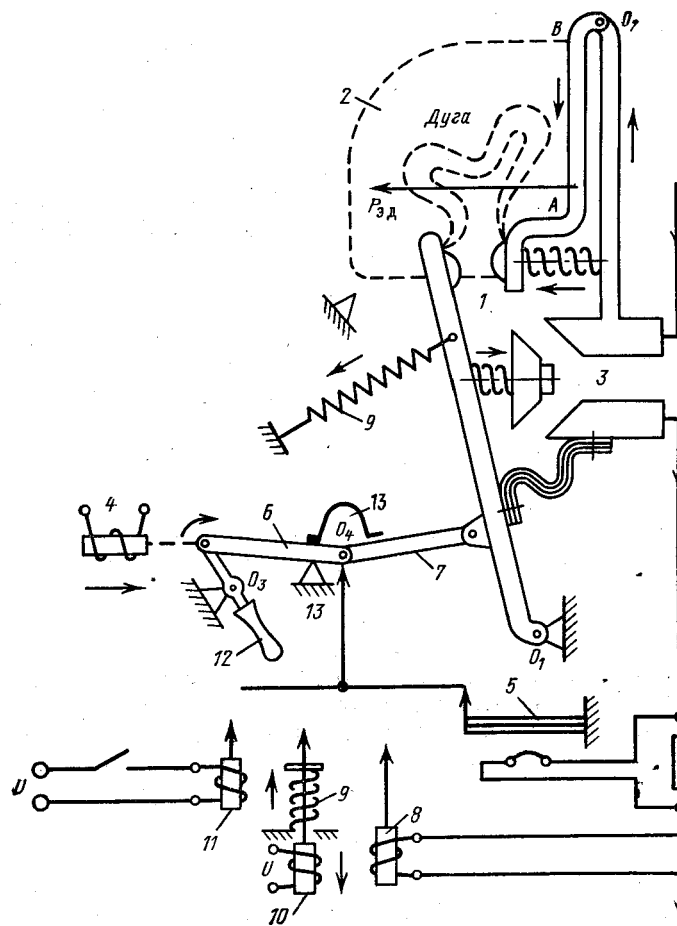


Рис. 78. Принципиальная схема автомата. 1-дугогасительные контакты, 2- камера дугогашения; 3-главные контакты; 4- электромагнит; 5,8,10,11 - электромагнитные расцепители; 6,7 - рычаги (звенья) механизма свободного расцепления; 13 - упор; 9 - пружина

18.4 Основные параметры автомата

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

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

На рис. 79, а показано изменение тока и напряжения на контактах в процессе отключения для небыстродействующего автомата, а на рис 79, б - для быстродействующего. Для простоты примем, что до КЗ ток нагрузки $i_H=0$. Установившийся ток КЗ $I_{кз. уст.}$. От момента начала КЗ ток растет по закону экспоненты до значения тока срабатывания автомата $i_{ср}$ (время t_0). После этого до момента размыкания контактов проходит время t_1 . Это время тратится на работу механизма расцепления, выбор провала контактов и является собственным временем отключения автомата. После расхождения контактов дуга гаснет за время t_2 . Время равное $t_{откл} = t_0 + t_1 + t_2$, является полным временем отключения автомата.

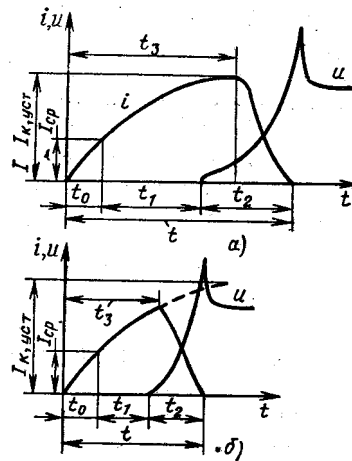


Рис. 79. Изменение тока цепи и напряжения на контактах в процессе отключения

Если $t_l \geq 0.01\text{с}$ то автомат называется обыкновенным (небыстродействующим). В быстродействующих автоматах $t_l = 0.002-0.008\text{с}$.

18.5 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.

а) *Автоматы серии А-3700.* $I_{ном} = 160-630\text{А}$ при $\sim U$ до 660 В и постоянном до 440 В.

$I_{доп.КЗ} = 200\text{ кА}$. Износостойкость $(5-10)10^3$ циклов. Автомат может снабжаться электромагнитным приводом для дистанционного управления.

б) *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.

в) *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 135кА при 380 В и 160 кА при 440 В.

г) *Выключатели на напряжение 1.140 В.* Такой выключатель (серии АЗ790) разработан на базе АЗ700 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.

18.6 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 не отключением катушек удерживающего электромагнита, а 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 со взрывным расцепителем - время отключения 0,001 с - не получили распространения из-за своей сложности.

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

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

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

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

18.7 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 $I_{ном}=1200, 1600, 3200, 4000$ и 6000 А.

18.8 Выбор, применение и эксплуатация автоматических воздушных выключателей

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

$$U_{ном.а} \geq U_{ном.с}; I_{ном.а} \geq I_{ном.н}$$

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

$$I_{уст. эм} \geq (2,5-3) I_{ном. Дв}$$

4. Для группы короткозамкнутых двигателей

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

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

5. Для двигателя с фазным ротором

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

6. Для группы двигателей с фазным ротором

$$I_{уст.эм} \geq (1,5-2) I'_{ном,дв} + \sum I_{ном,дв}$$

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

$$I_{\text{НОМ.РРАСЦ}} \geq 1,5 I_{\text{НОМ.ДВ}} \dots$$

8. Выбор по току КЗ :

а) для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$I_{\text{кз}} / I_{\text{уст.эм.}} \geq 1,25 - 1,4.$$

б) для автоматов с комбинированным расцепителем

$$I_{\text{кз}} / I_{\text{уст.эм.}} \geq 1,25 - 1,4..$$

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

19 ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

19.1 Назначение выключателей ВН

Выключатели ВН предназначены для коммутации цепей переменного тока с напряжением 3 кВ и выше во всех режимах, возможных в эксплуатации: включение и отключение номинальных токов, токов КЗ, токов х.х. силовых трансформаторов и емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий. Наиболее тяжелым режимом работы выключателя является включение и отключение токов КЗ.

19.2 Основные параметры

Основные параметры выключателей: номинальное напряжение, номинальный (длительный) ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток отключения, номинальная мощность отключения, номинальный ток включения, полное время включения и отключения.

Номинальный ток отключения $I_{O,НОМ}$ - наибольший ток, который выключатель способен надежно отключать при возвращающемся напряжении между фазами, равном наибольшему рабочему напряжению сети. $I_{O,НОМ}$ характеризует отключающую способность выключателя. Отключающая способность выключателя часто определяется номинальной мощностью отключения, МВ-А, трехфазного выключателя

$$S_{\text{откл. н ом}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{O,НОМ} 10^{-6}.$$

В большинстве случаев причина, вызывающая КЗ, носит временный характер. Например, в результате перенапряжения произошло перекрытие фарфорового изолятора и возникло КЗ на землю. Если причина быстро исчезла, а фарфоровая изоляция осталась неповрежденной, то при новом включении удастся восстановить подачу энергии потребителю. Этот процесс называется АПВ выключателя. Применение АПВ позволяет повысить надежность энергоснабжения.

Сохранность энергетического оборудования, бесперебойность энергоснабжения, динамическая устойчивость параллельно работающих систем требует, что длительность КЗ была возможно меньшей и ограничивалась временем 0,05-0,1с. Поэтому все выключатели снабжены дугогасительными устройствами, обеспечивающими гашение дуги в ограниченном объеме за время несколько сотых секунды.

Полное время отключения выключателя - это время от подачи команды до момента погасания дуги во всех полюсах. Оно состоит из собственного времени и времени гашения дуги.

При включении на существующее КЗ выключатель подвергается большим механическим, тепловым и электродинамическим нагрузкам. Способность выключателя включиться на существующее КЗ характеризуется номинальным током включения.

Номинальный ток включения - это наибольший ударный ток КЗ, на который выключатель включается без сваривания контактов и других повреждений, препятствующих его дальнейшей нормальной работе. Этот ток определяется либо амплитудой $i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{НОМ}$, либо действующим значением ударного тока за период после начала КЗ.

Время включения выключателя - это время от подачи команды на включение до завершения операции включения (посадка провода на защелку, окончание хода отделителя воздушного выключателя).

19.3 Требования, предъявляемые к выключателям

Выключатели являются наиболее ответственным аппаратом высоковольтной системы. При отказе выключателя авария развивается, что ведет к тяжелым разрушениям и большим материальным потерям, связанным с недоотпуском электроэнергии, прекращением работы крупных предприятий.

В связи с этим основным требованием к выключателям является особо высокая надежность их работы во всех эксплуатационных режимах. Отключение выключателей от любых нагрузок не должно сопровождаться перенапряжениями, опасными для изоляции элементов установки. Отключение цепи при КЗ должно происходить за минимально возможное время.

В связи с ростом мощности в единице оборудования (генераторах, трансформаторах) растет частота собственных колебаний цепи, а следовательно, и скорость восстановления напряжений. Выключатель должен обеспечивать надежное отключение цепи при условии восстановления напряжения.

Вывод выключателя из рабочего состояния для ревизии и ремонта связан с большими трудностями, т.к. приходится переходить на другую схему распреустройства, либо отключать потребитель. В связи с этим выключатель должен допускать возможно большее число отключений от КЗ без ревизии и ремонта. Современные выключатели могут отключать без ревизии до десяти КЗ при токе отключения, равном номинальному $I_{O.ном}$

Отключение выключателем КЗ не должно сопровождаться выбросом из него пламени и раскаленных газов, что может привести к перекрытию изоляции в распреустройстве.

19.4 Классификация выключателей

Выключатели могут быть классифицированы по методу гашения дуги, виду изоляции токоведущих частей между собой и на землю, принципам заложенным в конструкцию дугогасительного устройства.

По способу гашения дуги высоковольтные выключатели могут быть масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные, электромагнитные и др. Отдельные типы выключателей с ограниченной отключающей способностью называют выключателями нагрузки.

По конструкции выключатели каждого типа в зависимости от выполняемых функций (назначения) в схемах распреустройств подразделяются на генераторные, сетевые или постоянные. Генераторные выключатели характеризуются большими значениями номинальных токов и большими токами отключения при меньших напряжениях, сетевые - меньшими номинальными токами и более высокими напряжениями, подстанционные наивысшими номинальными напряжениями, наиболее высокой отключающей способностью, быстродействием и наличием АПВ. Аппараты различаются еще по другим характеристикам - быстродействию, наличию АПВ, исполнению для наружной или внутренней установки, по числу фаз, по роду привода и т.д.

19.5 Принцип действия и устройство высоковольтных выключателей, физические явления в электрическом аппарате

Это основной вид выключателей на 6 - 220 кВ. В зависимости от способа изоляции токоведущих частей различают *баковые выключатели* - с большим объемом масла, масло служит как дугогасящая среда и как изоляция, и *выключатели маломасляные* - с малым объемом масла, мало служит только дугогасящей средой, изоляция токоведущих частей между собой и от земли производится с помощью твердых диэлектриков.

На напряжения 35 - 220 кВ применяются в основном баковые выключатели. Маломасляные выключатели являются основными на напряжения до 10 кВ.

В масляных выключателях дуга, образующаяся в между контактами, горит в трансформаторном масле. Под действием дуги масло разлагается и образующиеся газы и пары используются для ее гашения.

Достоинства масляных выключателей - относительная простота конструкции, большая отключающая способность Ю,НОМ и независимость от атмосферных явлений.

Недостатком, особенно баковых выключателей, является наличие большого количества масла, что приводит к большим габаритам и массам как самих выключателей, так и распределительных устройств, повышенной пожаро- и взрывоопасности, необходимости специального масляного хозяйства.

19.6 Баковые масляные выключатели

Эти выключатели на напряжение до 20 кВ и относительно малые токи отключения выполняются большей частью однобаковыми (три полюса в одном баке), на напряжение до 35 кВ и выше - трехбаковыми (каждая фаза в отдельном баке) с общим или индивидуальными приводами. Выключатели могут снабжаться электромагнитными или пневматическими приводами и работают с АПВ.

Основой конструкции выключателя (рис. 7.1) является бак цилиндрической или эллипсоидальной формы, внутри которого и на нем монтируется контактная и дугогасительная системы, ввод и привод. Бак заливается до определенного уровня трансформаторным маслом. Между поверхностью масла и крышкой бака (обычно 20 - 30% объема бака) - воздушная буферная подушка, сообщаемая с окружающим пространством через газовую трубку. Воздушная подушка снижает давление, передаваемое на стенки бака при отключении, исключает выброс масла из бака и предохраняет выключатель от взрыва при чрезмерном давлении.

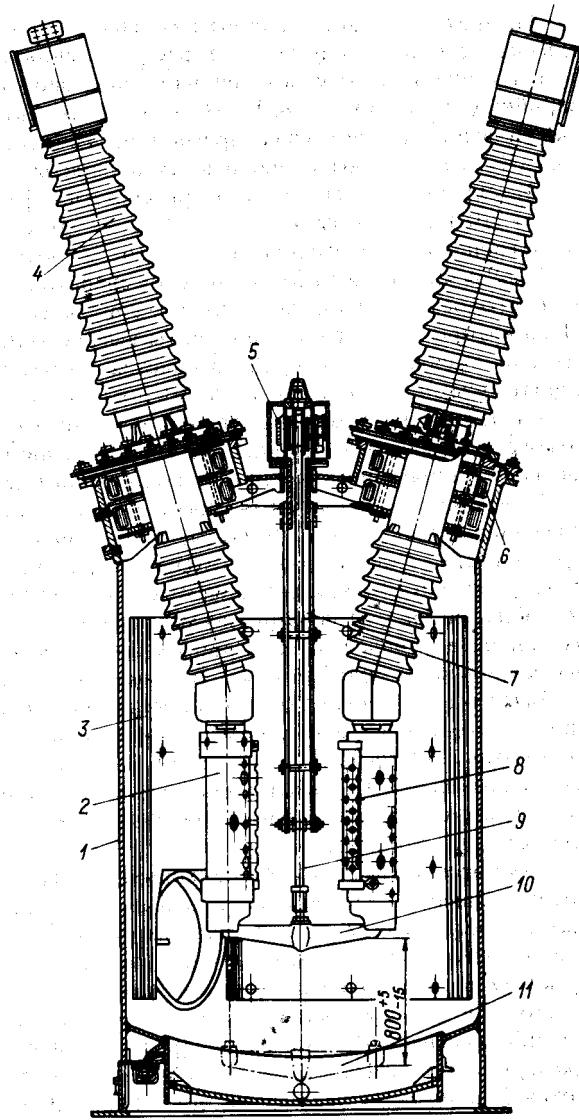


Рис. 80. Полнос масляного бакового выключателя на 220 кВ, 1 - бак; 2 — дугогасительная камера с неподвижными контактами и шунтирующим резистором; 3 — изоляция бака; 4 — ввод; 5 — приводной механизм; 6 - трансформатор тока; 7 — направляющее устройство; 8 — шунтирующий резистор; 9 — изоляционная тяга; 10 — траверса с подвижными контактами; 11 — положение траверсы после отключения

Высота уровня масла над местом разрыва контактов должна быть такой, чтобы исключить выброс в воздушную подушку горячих газов, выделяющихся при отключении вследствие разложения масла. Прорыв этих газов может привести к образованию взрывчатой смеси (гремучего газа) и взрыву выключателя. Высота уровня масла над местом разрыва контактов определяется номинальными напряжениями и током отключения и может составлять 300-600 мм в выключателях на напряжение 6 - 10 кВ и до 2500 мм в выключателях на напряжение 220 кВ.

При напряжении 3 - 6 кВ и малых отключающих токах применяется простой разрыв в масле. При напряжениях 10, 35 кВ и выше используются как простые, так и более сложные дугогасительные устройства с продольным, поперечным, продольно-поперечным дутьем, с одно и многократным разрывом.

Масляные баковые выключатели на 35 кВ и выше имеют встроенные трансформаторы тока.

19.7 Маломасляные выключатели

В отличие от баковых выключателей масло служит здесь только дугогасящей средой, а изоляцией токоведущих частей и дугогасительного устройства относительно земли осуществляется с помощью твердых изоляционных материалов (керамика, текстолит, эпоксидные смолы и т.п.), диаметры цилиндров у этих выключателей значительно меньше и соответственно намного меньше объем и масса масла.

По сравнению с баковыми и воздушными маломасляные выключатели обладают следующими преимуществами:

1. Они имеют меньшую массу и габаритные размеры при малом объеме масла.
2. ДУ всегда готово к работе независимо от наличия сжатого воздуха.
3. Осмотр и ремонт дугогасительных камер и контактов возможен без слива масла, что обеспечивает удобство эксплуатации.
4. Путем применения унифицированных узлов выключатель довольно легко можно выполнить на напряжение до 500 кВ.

Однако эти выключатели имеют и недостатки:

1. Они менее надежны в работе, чем баковые. Изоляционные детали - рубашки, опорная изоляция - подвергаются повышенным механическим нагрузкам, Ю,ном пока ниже чем у баковых.
2. Маломасляные выключатели не допускают установки встроенных трансформаторов тока.

Благодаря своим преимуществам маломасляные выключатели найдут широкое распространение в установках напряжением 6 - 10 кВ.

Выключатели по компоновке выполняются с дугогасительными камерами внизу (ход подвижного контакта сверху вниз) и с камерами, расположенными сверху (ход подвижного контакта снизу вверх). Применяются выключатели для внутренней установки как распределительные и генераторные и для внешней установки как распределительные и подстанционные.

Широко распространены маломасляные выключатели серии ВМП-10 (выключатель масляный подвесного типа} на 10 кВ и токи от 600 до 3200 А, номинальный ток отключения 31, 5 кА, номинальная мощность 550 МВ-А, полное время отключения 0, 12 с.

Особенностью конструкции *маломасляных генераторных выключателей типа МГУ-20* является токопровод, имеющий два параллельных контура: основной, контакты которого расположены открыто, и дугогасительный, контакты которого находятся в дугогасительных камерах.

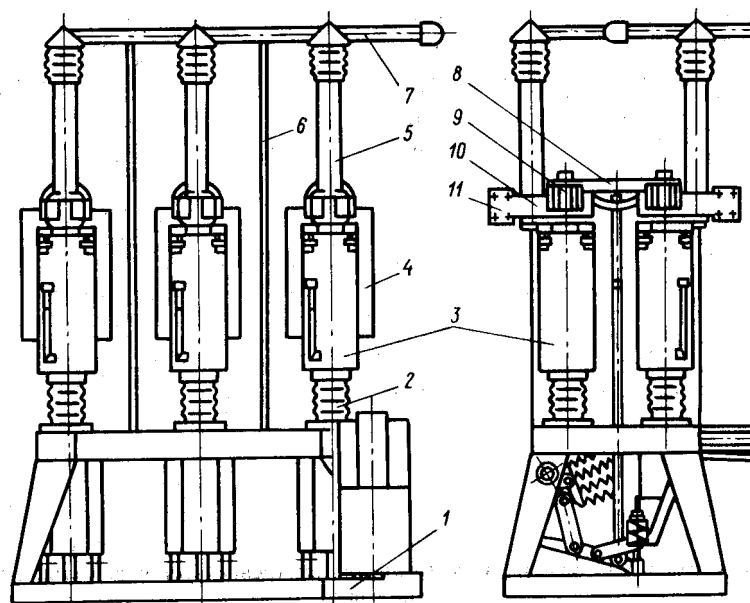


Рис. 81. Выключатель маломасляный генераторный (тип МГУ-20) 1 — основание; 2 — опорный

изолятор; 3, 5 — бак; 4 — внутривольная перегородка; 6 — междувольная перегородка; 7 — газотвод; 8 — траверса с шинами основной и дугогасительной контуров; 9 — основные контакты; 10- токоведущая шина; 11 — токоподвод

Выключатель маломасляный для внешней установки (распределительный, подстанционный) состоит из трех основных частей: гасительных устройств, помещенных в фарфоровые рубашки; фарфоровых опорных колонок и основания (рамы). Изоляционный цилиндр, охватывающий дугогасительное устройство защищает фарфоровую рубашку от больших давлений, возникающих при отключении. Число разрывов на фазу может быть один, два и больше. Расположение камер сверху более перспективно для отключающей способности.

20 ВЫБОР И ПРОВЕРКА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

20.1 Приводы масляных выключателей

Механизм привода выключателя. Для обеспечения дугогашения подвижный контакт выключателя при отключении должен обладать определенной линейной скоростью (1,5—10 м/с). Как правило, контакты выключателей движутся поступательно, а звенья, передающие усилия контактам от пружин или привода, имеют вращательное движение. Механизм, преобразующий вращательное движение в поступательное, называется прямым.

Особенности привода масляных выключателей на напряжение 110 кВ и выше. При включении на существующее КЗ дуга загорается до соприкосновения контактов и существует до момента их соединения. При этом контактные поверхности могут частично расплавляться, что ведет к их привариванию при замыкании. Кроме того, вызванные дугой при включении разложение и испарение масла могут препятствовать ее гашению при последующем отключении. Возникновение дуги при включении создает давление газа внутри ДУ, которое может снижать скорость контакта на самом ответственном участке пути. Как показывают экспериментальные исследования, длительность горения дуги при включении не должна превышать 0,005 с.

В настоящее время применяются ручные, электромагнитный, пружинный, пневматический и пневмогидравлический приводы.

Ручные приводы. При ручном приводе используется мускульная сила человека. Уменьшение усилия, необходимого для включения, достигается применением рычажных систем. Эти приводы применяются только для маломощных выключателей с напряжением 6—10 кВ.

Уменьшение обгорания контактов с помощью их облицовки металлокерамикой облегчает включение привода при существующем КЗ и позволяет увеличить номинальный ток включения.

При ручных приводах невозможно дистанционное включение выключателей. Поэтому широкая автоматизация подстанций ограничивает их применение.

Электромагнитные приводы. Электромагнитный привод предназначен для выключателей с максимальным статическим моментом на валу не более 400 Н·м. Вал привода через муфту и рычажную передачу соединяется с валом выключателя. Включение производится броневым электромагнитом постоянного тока с якорем и катушкой. Применение броневых электромагнитов позволяет получить большой ход якоря и большую силу тяги в конце хода, что необходимо для преодоления противодействующих сил выключателя. При наладке ручное включение производится с помощью рычага.

Пружинные приводы.

В пружинном приводе энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя малой мощности (менее 1 кВт),

20.2 Воздушные выключатели

Получили широкое распространение и во многих случаях вытеснили масляные. Они позволили перейти к классам напряжения 750 и 1150 кВ и в основном применяются:

как сетевые на напряжения 6 - 1150 кВ с I_N до 4000 А и I_0 до 160 кА;

как генераторные на напряжения 6 - 20 кВ с I_N до 20 А и I_0 до 160 кА;

как выключатели нагрузки на 6 - 220 кВ и 110 - 500 кВ и выключатели комплектных распределительных устройств на напряжение до 35 кВ.

Выключатели выпускаются различного климатического исполнения, для различных категорий размещения и различного вида установки (опорные, подвесные, настенные, выкатные и др.)

Независимо от типа и конструкции воздушный выключатель состоит из трех основных частей: дугогасительного устройства с отделителем или без него, системы снабжения сжатым воздухом и системы управления. Система управления выполняется с одним пневмоприводом с механической передачей, с пневмогидравлической передачей и пневмосветовой передачей.

Гашение дуги в выключателях осуществляется сжатым воздухом давлением 0,6 - 5 МПа в различных камерах. При отключении сжатый воздух из бака подается в ДУ. Дуга, образующаяся в камере ДУ, обдувается интенсивным потоком сжатого воздуха, выходящим в атмосферу. Изоляция токоведущих частей между собой осуществляется с помощью твердых диэлектриков и воздуха.

В *выключателях с отделителем* размыкание дугогасительных контактов осуществляется одним и тем же потоком воздуха, поступающим из отдельного резервуара. Контакты выполнены в виде контактно-поршневых механизмов. Во включенном положении выключателя в ДУ и в отделителе все контакты замкнуты. При подаче команды на отключение сжатый воздух из резервуара подается в дугогасительную камеру, размыкает контакты и гасит дугу.

В *выключателе без отделителя* широко применяются воздушные камеры (резервуары), в которых размещены ДУ. Привод контактов отделен от дугогасящей среды. При размыкании контактов открываются выхлопные клапаны и сжатый воздух, вытекая из камер через сопла контактов, гасит дугу.

Широкое применение получили выключатели типа ВВП-35 с обычным отделителем электрических установок. Параметры выключателя: $U_{\text{НОМ}}=35$ кВ; $I_{\text{НОМ}} = 1250$ А; I_0 , ном = 20 кА; $I_0 = 0,08$ с, $P_{\text{НОМ}}=2$ МПа. Особенностью выключателя является возможности многократной коммутации $I_{\text{НОМ}}$.

Генераторные выключатели ВВГ-20. ($U_{\text{НОМ}}=20$ кВ; $I_{\text{НОМ}}=20$ кА; I_0 , ном = 160 кА, сквозной ток 410 кА) .

Выключатели серии ВВБ с дугогасительными камерами в баке со сжатым воздухом.

Серии ВВБК на $U_{\text{НОМ}}=110-1150$ кВ; $I_{\text{НОМ}}=3200$ и 4000 А; I_0 , ном = 50-40 кА; $t_0=0,04$ с. $P_{\text{НОМ}}=4$ МПа.

20.3 Элегазовые выключатели

В элегазовых выключателях гашение дуги осуществляется за счет охлаждения еедвигающимся с большой скоростью элегазом (шестифтористой средой SF_6), который используется как изолирующая среда.

Конструкции элегазовых выключателей выполняются в основном с *автокомпрессорным дутьем или магнитным дутьем*.

При первом способе электродуга охлаждается элегазом, который перетекает из резервуара высокого давления (около 1 МПа) в резервуар низкого давления (0,3 МПа), т. е. используется тот же принцип, что и в воздушном выключателе. Схема ДУ автокомпрессорным продольным дутьем приведена на рис. 7.3,а. Подвижный контакт 2 вместе с изоляционным соплом 3, перегородкой 4 и цилиндром 5, отходя от неподвижного контакта 1, надвигается на поршень 6. Элегаз через отверстия в перегородке и сопло оmyвает дугу с большой скоростью и гасит ее через 0,02 — 0,03 с.

Схема ДУс магнитным дутьем приведена на рис. 7-3,б. Устройство размещается в изоляционном цилиндре 1, наполненном элегазом. На дугу, возникающую между расходящимися контактами 2 и 3, действует радиальное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами 4 (или последовательной катушкой). Дуга быстро перемещается по окружности, усиленно охлаждается и гаснет. Такие устройства применяются в выключателях нагрузки.

Элегазовые выключатели наиболее перспективны для U выше 35 кВ и могут быть созданы на U 800 кВ и выше.

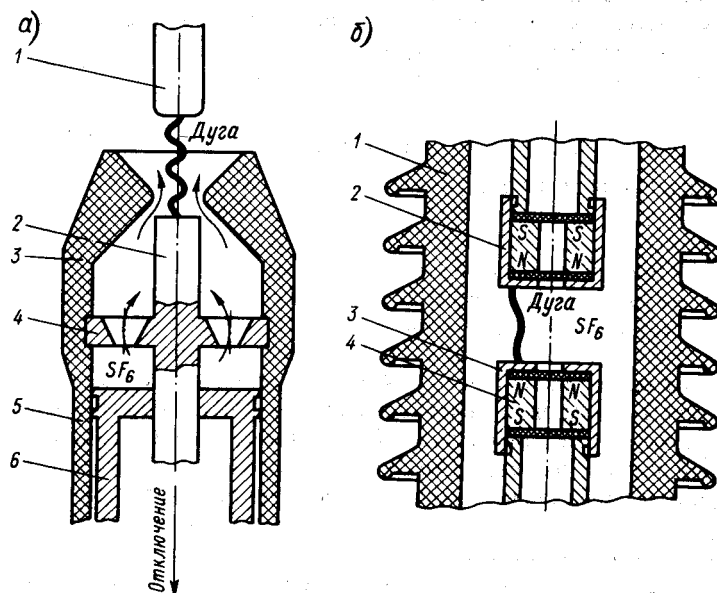


Рис. 82. Схемы дугогасительных устройств элегазовых выключателей: а — с автокомпрессорным дутьем; б — с магнитным дутьем

20.4 Вакуумные выключатели

В вакуумных выключателях контакты расходятся под высоким вакуумом (давление равно 10^{-4} Па). Возникающая при расхождении контактов дуга быстро гаснет благодаря интенсивной диффузии зарядов в вакууме. Высокие дугогасящие свойства этой среды позволили создать выключатели на напряжение до 35 кВ. Благодаря своим преимуществам вакуумные выключатели вытесняют другие выключатели, в том числе и электромагнитные, особенно в диапазоне напряжений 6 - 10 кВ.

Основные преимущества:

- 1) малая плотность воздуха создает возможность гашения дуги без ДУ за время 0,01 - 0,02 с;
- 2) отсутствие компрессорных установок, масляного хозяйства, а также необходимости в пополнении или замене дугогасящей среды;
- 3) высокая механическая и коммутационная износостойкость (до $5 \cdot 10^5$ и 10^6 операций соответственно) ;
- 4) минимум обслуживания, бесшумность и чистота, снижение эксплуатационных затрат (почти в 2 раза), срок службы 25 лет;
- 5) полная взрыво и пожаробезопасность.

Недостатками выключателей являются:

- 1) трудности разработки и изготовления, связанные с созданием вакуумно-прочных металлов и специальных контактных материалов, сложностью вакуумного производства;
- 2) большие капитальные вложения, необходимые для организации массового производства.

ДУ выключателя выполняется как герметичный сосуд, давление внутри которого равно $1,33 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-6}$ Па. Нажатие подвижного контакта на неподвижный создается за счет атмосферного давления. При больших номинальных токах ставится дополнительная контактная пружина.

Выключатели вакуумные серии ВВЭ-10 выпускаются на напряжение 10 кВ частотой 50 - 60 Гц, номинальные токи 20 - 31,5 кА при включаемых ударных токах 52 - 80 кА.

20.5 Электромагнитные выключатели

Выключатели электромагнитные обладают теми достоинствами, что для своей работы не требуют ни масла, ни сжатого воздуха, ни тем более элегаза, они допускают большое число включений. Однако отключающая способность их ограничена по напряжению. Гашение в электромагнитных выключателях основано на воздействии на ствол дуги и достижении падения напряжения на стволе дуги, большего приложенного. Они находят применение как выключатели для КРУ на напряжение 6 — 20 кВ, токи до 3200 А при частых коммутациях (выключатели нагрузки — выключатели в цепях мощных двигателей и других нагрузок).

Гашение дуги здесь осуществляется при помощи магнитного дутья в камерах с продольными (прямыми, извилистыми и т. п.) щелями. Катушки магнитного дутья и токопроводы к ним обычно при замкнутых контактах не обтекаются током. При отключении возникающая дуга перебрасывается на эти детали и включает их последовательно в цепь тока. Возбуждается поле гашения дуги. Дуга гаснет, ток в цепи обрывается. Таким образом, эти детали находятся под током только на время гашения — примерно 0,02 с.

Механическая износостойкость выключателей — до 50 000 циклов, коммутационная — 5000 отключений.

20.6 Выключатели нагрузки

Выключатели нагрузки предназначены для управления высоковольтными синхронными и асинхронными двигателями большой мощности, а также другими нагрузками с малой индуктивностью. Они должны обеспечивать надежную коммутацию токов рабочих режимов (пуск, реверс, торможение, остановка и т. п.) с большой частотой (300 — 600 вкл/ч). Соответственно этому они должны иметь сравнительно с выключателями намного большую механическую и коммутационную износостойкость. Защита цепей здесь осуществляется соответствующими выключателями или предохранителями.

В настоящее время все шире применяются для указанных целей вакуумные и электромагнитные контакторы вместо ранее применявшихся автогазовых выключателей, которые не удовлетворяют современным требованиям. Ниже приведены некоторые отечественные конструкции.

Контактор вакуумный КВТ-6/10-400-4. Его данные: $U_{\text{ном}} = 6$ и 10 кВ; $I_{\text{ном}} = 400$ А; $I_{\text{откл}} = 4$ кА (50 отключений); $I_{\text{вкл}} = 15$ кА; $I_{\text{терм}} = 4$ кА (4 с); износостойкость механическая 10^6 циклов, коммутационная 10^5 циклов; частота включений 300 вкл/ч.

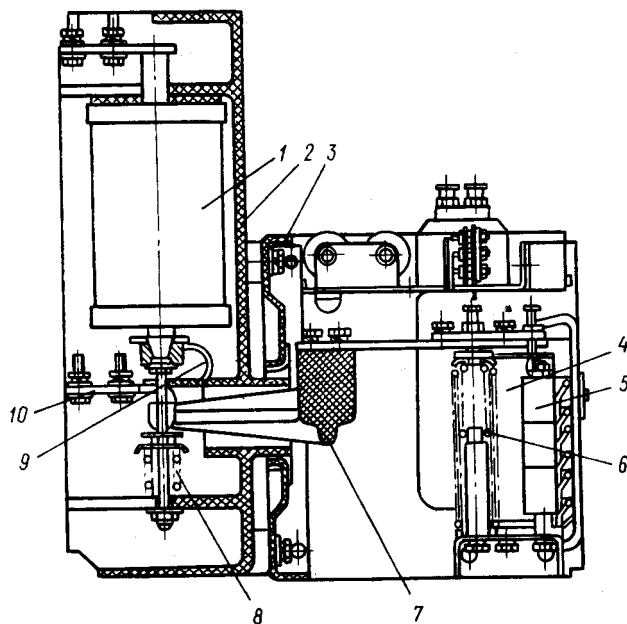


Рис. 83. Контактор вакуумный на напряжение 10 кВ.

Общий вид контактора приведен на рис. 83. Контактёр состоит из трех полюсов высокого напряжения, корпусов 2 и 3 электромагнитного привода 4, цепей управления 5. Устройство дугогасительных камер 1 аналогично вакуумному выключателю. Камеры крепятся к верхней опорной части защитного изоляционного корпуса 2. Все другие узлы монтируются на корпусе 3. Нижний вывод 10 и подвижный контакт камеры соединены гибкой связью 9. Для дополнительного поджатия подвижного контакта камеры установлена пружина 8. Привод и отключающая пружина 6 воздействуют на подвижный контакт через траверсу 7. Питание электропривода может осуществляться как переменным, так и постоянным током.

Контактор электромагнитный типа К2-6. Контактор выполняется на $U_{НОМ} = 6$ кВ, частоту 50 и 60 Гц; $I_{НОМ} = 40...400$ А (пять величин); $I_{откл} = 1,5...4,2$ кА; $I_{вкл} = 4...8$ кА; $I_{терм} = 2...4,2$ кА (4 с); имеет износостойкость механическую 10^6 циклов, коммутационную 10^5 циклов; частоту включений 300 вкл/ч.

Контактор состоит из трех полюсов, установленных на четырех изоляционных рейках. Рейки стягивают стальные щеки, между которыми расположены полюсы, электромагнитный привод и контакты вспомогательной цепи.

Каждый полюс контактора состоит из системы неподвижного контакта, которая содержит катушку магнитного дутья с сердечником и магнитопроводами и саму неподвижную контакт-деталь; системы подвижного контакта, установленной на подвижном изоляционном валу и связанной с выводом полюса гибкой связью; камеры дугогашения, состоящей из набора керамических плиток и керамических щек, заключенных в каркас из пластмассовых деталей.

Электромагнитный привод включает в себя сердечник, катушку и якорь, который поворачивается в подшипниках на оси и связан системой рычагов с поворотным валом. Вспомогательные контакты собраны в блок и имеют привод от того же вала.

Реверсор типа Р-6. Реверсор состоит из трех контакторов, соединенных по определенной схеме и смонтированных в одном шкафу.

20.7 Выбор, применение и эксплуатация выключателей ВН

При выборе выключателей его номинальные параметры сравниваются с параметрами сети в месте его установки. Выключатель выбирается по наиболее тяжелому режиму работы который возможен в эксплуатации.

1. Номинальное напряжение выключателя $U_{НОМ.В}$ должно быть равно или больше номинального напряжения защищаемой сети

$$U_{НОМ.В} \geq U_{НОМ.С}.$$

2. Номинальный длительный ток $I_{НОМ.В}$ должен быть больше номинального тока установки $I_{НОМ.У}$

$$I_{НОМ.В} > I_{НОМ.У}.$$

3. Номинальный ток отключения выключателя $I_{О.НОМ}$ должен быть больше максимального расчетного тока КЗ $I_{КЗ}$ к моменту расхождения контактов. $I_{О.НОМ} > I_{КЗ}$

При определении $I_{КЗ}$ необходимо рассмотреть все возможные варианты КЗ и выбрать наиболее тяжелый вероятный режим. Как правило, наиболее тяжелые режимы создаются при отключении трех- и однофазного КЗ на землю.

4. Ток $I_{Вкл.НОМ}$ должен быть не менее ударного тока КЗ $I_{У.КЗ}$, протекающего через выключатель

$$I_{Вкл.НОМ} > I_{У.КЗ}$$

5. Расчетное время размыкания берется равным максимально возможному.

6. Термическая стойкость проверяется из условия протекания через выключатель ток КЗ

в течении максимального времени, обусловленного срабатыванием защиты.

7. Номинальный ток электродинамической стойкости выключателя должен превышать максимально возможное значение ударного тока КЗ, которое будет в установке.

8. Для мощных системных выключателей, от работы которых зависит устойчивость параллельно работающих сетей, важным параметром является время отключения и время повторного включения. Иногда эти параметры диктуют выбор типа выключателя и его привода.

При выборе выключателя следует учитывать следующие обстоятельства:

1. При $U_H = 6 - 10$ кВ и редких коммутациях целесообразно применение маломасляных выключателей. При частых коммутациях рекомендуется применять вакуумные и элегазовые, обладающие большим сроком службы.

2. При номинальном напряжении 35 - 110 кВ и $I_{0.ном}$ до 20 кА целесообразно применять масляные выключатели. При больших U_H и больших $I_{0.ном}$ применяются воздушные и элегазовые выключатели.

3. При экономической оценке выбираемого типа выключателей следует учесть, что, несмотря на то, что вакуумные выключатели имеют большую стоимость, применение их более оправдано ввиду малых расходов на техническое обслуживание и большого срока службы ДУ (до 25 лет).

21 РАЗЪЕДИНИТЕЛИ

21.1 Назначение разъединителей

Разъединители — аппараты, предназначенные для включения и отключения участков электрических цепей под напряжением при отсутствии нагрузочного тока. Они применяются во всех высоковольтных установках для обеспечения видимого разрыва при отключении какого-либо участка цепи, а также для производства переключений и набора нужной схемы. Все операции с разъединителями, как правило, выполняются при обесточенных цепях.

Кроме того, разъединители наружной установки рассчитываются на возможность разрыва посредством их ножей зарядных токов воздушных и кабельных линий, а также токов холостого хода силовых трансформаторов и токов небольших нагрузок; поэтому их контакты часто снабжаются дугогасительными рогами.

На рис. 84 показаны схемы включения разъединителей.

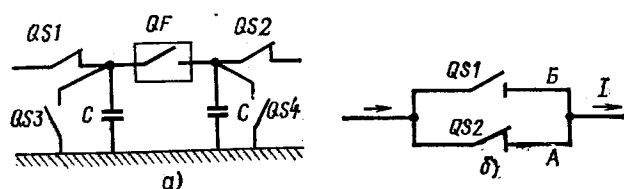


Рис. 84. Схемы включения разъединителей:

- а) отсоединение от напряжения оборудования ВН перед ревизией или ремонтом;
- б) перевод нагрузки с одной ветви А на другую Б.

Рассмотрим схему отсоединения от напряжения оборудования ВН перед ревизией или ремонтом (рис. 84, а). Согласно правилам техники безопасности оборудование, выводимое в ремонт, должно быть отключено. Между выводами отключенного аппарата и цепью, оставшейся под напряжением, должен быть создан видимый воздушный промежуток, гарантирующий безопасные условия работы обслуживающего персонала.

Для безаварийной работы ток в цепи сначала отключается выключателем QF , и только потом размыкаются контакты разъединителей $QS1$ и $QS2$. В этом случае разъединителями отключаются небольшие емкостные токи, создаваемые опорной изоляцией отключаемого «аппарата и присоединенными к нему проводниками.

После размыкания $QS1$ и $QS2$ выключатель QF , подлежащий ремонту, должен быть заземлен с обеих сторон с помощью дополнительных разъединителей $QS3$ и $QS4$. Если ножи $QS3$ и $QS4$ не заземлены, то на выводах выключателя QF может возникать высокий потенциал за счет емкостной связи с линиями высокого напряжения.

В ряде случаев разъединителями можно пользоваться для перевода нагрузки с одной ветви А на другую Б (рис. 84, б). Для этого при замкнутом разъединителе $QS2$ включают разъединитель $QS1$. После этого разъединитель $QS2$ отключают. Дуга на его контактах не возникает, так как напряжение на них равно падению напряжения на ветви $QS1$, которое ничтожно мало.

21.2 Требования, предъявляемые к разъединителям

К разъединителям предъявляются следующие требования:

1. Контактная система должна надежно пропускать номинальный ток сколь угодно длительное время. В особо тяжелых условиях работают разъединители наружных установок, подвергающиеся воздействию воды, пыли, льда. Контактная система должна иметь необходимую динамическую и термическую стойкость.

2. Разъединитель и механизм его привода должны надежно удерживаться во включенном положении при протекании тока КЗ. В отключенном положении подвижный контакт должен быть надежно фиксирован, так как самопроизвольное включение может привести к очень тяжелым авариям и человеческим жертвам.

3. В связи с особой ролью разъединителя как аппарата безопасности промежуток между разомкнутыми контактами должен иметь повышенную электрическую прочность.

4. Привод разъединителя целесообразно блокировать с выключателем. Операции с разъединителем должны быть возможны, только когда выключатель отключен.

21.3 Классификация разъединителей

Конструктивное различие между отдельными типами разъединителей состоит прежде всего в характере движения подвижного контакта (ножа). По этому признаку различают разъединители:

1) *вертикально-поворотного (врубного) и горизонтально-поворотного* типов с вращением ножа в плоскости, параллельной или перпендикулярной осям поддерживающих изоляторов данного полюса соответственно;

2) *качающегося типа* с вращением ножа совместно с поддерживающим его изолятором в плоскости, параллельной осям поддерживающих изоляторов данного полюса;

3) *с прямолинейным движением* вдоль размыкаемого промежутка либо, только ножа, либо ножа совместно с изолятором (катящегося типа);

4) *со складывающимся ножом*, со сложным движением (поворот и складывание) ножа;

5) *подвесного типа* с перемещением ножа вместе с поддерживающими изоляторами в плоскости, параллельной осям поддерживающих подвесных изоляторов.

Разъединители могут иметь приводы: ручной – оперативную штангу, рычажный или штурвальный и двигательный – электрический, пневматический или гидравлический.

Во избежание ошибочных действий, т. е. размыкания цепи под током, что может привести к крупным авариям и несчастным случаям, разъединитель всегда блокируется с выключателем. Блокировка допускает оперирование разъединителем только при отключённом выключателе. По исполнению блокировка может быть механической, механически-замковой, электромагнитно-замковой или другой.

21.4 Принцип действия, устройство и основные параметры разъединителей, физические явления в электрических аппаратах

Отличительной чертой разъединителей в сравнении с выключателями является отсутствие дугогасительных устройств.

Разъединители строятся для внутренней и для наружной установки на всю шкалу токов и напряжений. Они могут выполняться как трехполюсными на общей раме (обычно при напряжениях до 35 кВ), так и однополюсными при более высоких напряжениях. Последнее обусловлено тем, что при напряжениях свыше 35 кВ требуемые расстояния между фазами достаточно велики и общая рама получается чрезвычайно громоздкой и тяжелой.

Полюс разъединителя независимо от разнообразия конструкций состоит из неподвижного и подвижного (ножа) контактов, укрепленных на соответствующих изоляторах, опорной плиты или рамы и привода.

Основным элементом разъединителя являются его контакты. Они должны надежно работать при номинальном режиме, а также при перегрузках и сквозных токах короткого замыкания. В разъединителях применяют высокие контактные нажатия. При больших токах контакты выполняют из нескольких (до восьми) параллельных пластин. Применяют пластины прямоугольного, швеллерного и круглого сечений. Для обеспечения высокой электродинамической устойчивости широко используют электромагнитные и электродинамические компенсаторы (часто говорят «замки»).

21.5 Разъединители для внутренней установки

Для внутренних установок, не подверженных воздействию атмосферы и с напряжением, как правило, не выше 20 кВ, наиболее широко распространены рубящие разъединители с движением подвижного контакта (ножа) в вертикальной плоскости. К ним относится трёхполюсный разъединитель типа РВ на напряжение 10 кВ и ток 400 А. Для управления разъединителями типа РВ на напряжение 10 кВ применяются рычажные системы с ручным или моторным приводом.

Пример исполнения *разъединителя внутренней установки* приведен на рис.85. Полус разъединителя состоит из неподвижных контактов 1, укрепленных на опорных изоляторах 5. Неподвижные контакты охватываются подвижным контактом 2, состоящим из двух ножей. Контактное нажатие создается пружинами 6. Компенсация электродинамических сил в контактах происходит за счет одинаково направленных токов в подвижных ножах. Привод контактов осуществляется через приводной вал 7, соответствующие рычаги и тяговый изолятор 3. Собирается разъединитель на раме 4.

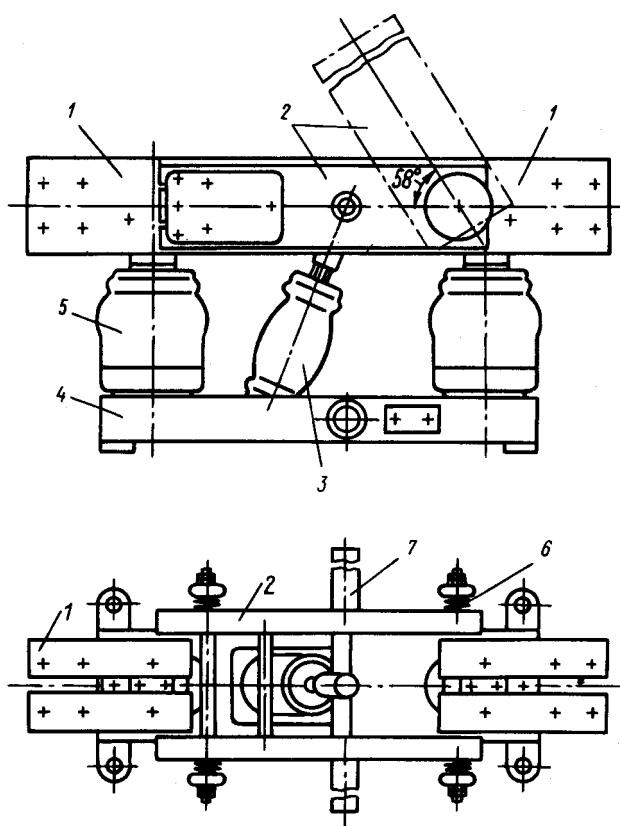


Рис. 85. Разъединитель внутренней установки

На рис. 85 приведена схема ведущего полюса разъединителя *горизонтально-поворотного* типа.

21.6 Разъединители для наружной установки

Для наружной установки широко используются разъединители поворотного типа РНД. На рис.85 представлен разъединитель типа РНДЗ-1 на напряжение 220 кВ и номинальный ток 2 кА (до 750 кВ). На раме 1 смонтированы неподвижные изоляторы 2 и подвижные изоляторы 3, которые могут вращаться вокруг своей вертикальной оси. С подвижным изолятором связаны контакты разъединителя в виде ножей 5, вращающихся в горизонтальной плоскости. Места сочленения подвижных деталей защищены кожухом 4. Для размыкания ножей 5 поворачивается правый изолятор 3, который с помощью тяги 8 поворачивает левый изолятор 3. При необходимости правый нож в положении «отключено» может быть заземлен с помощью

дополнительного ножа 7, который вращается в вертикальной плоскости и замыкается с контактом 6. Благодаря механической блокировке заземление возможно только при отключенном положении ножей 5. Разъединители такого типа применяются при напряжении до 750 кВ.

Следует отметить, что площадь открытого распределительного устройства (ОРУ) в значительной степени определяется площадью, занимаемой разъединителями. При напряжении $U_{\text{НОМ}} > 330$ кВ значительную экономию площади дают подвесные разъединители (рис. 86). Неподвижный контакт 1 в виде кольца укреплен на изоляторе 2. В качестве опоры контакта 1 могут использоваться трансформаторы тока или напряжения. Конический подвижный контакт 3 подвешен к гирлянде 4 подвесных изоляторов на стальных тросах 5. Тросы 5 пропущены через блоки 6 на портале 7 и связаны с барабаном электролебедки. Подвижный контакт 3 соединен с токоведущей трубой 9, неподвижный контакт соединен с гибкой шиной 8 либо с контактом аппарата. При включении контакт 3 опускается вниз под действием специального груза, который создает необходимое контактное нажатие. При отключении контакт 3 и связанный с ним груз поднимаются с помощью электролебедки. Такие разъединители разработаны на напряжение до 1150 кВ и длительные токи до 3,2 кА.

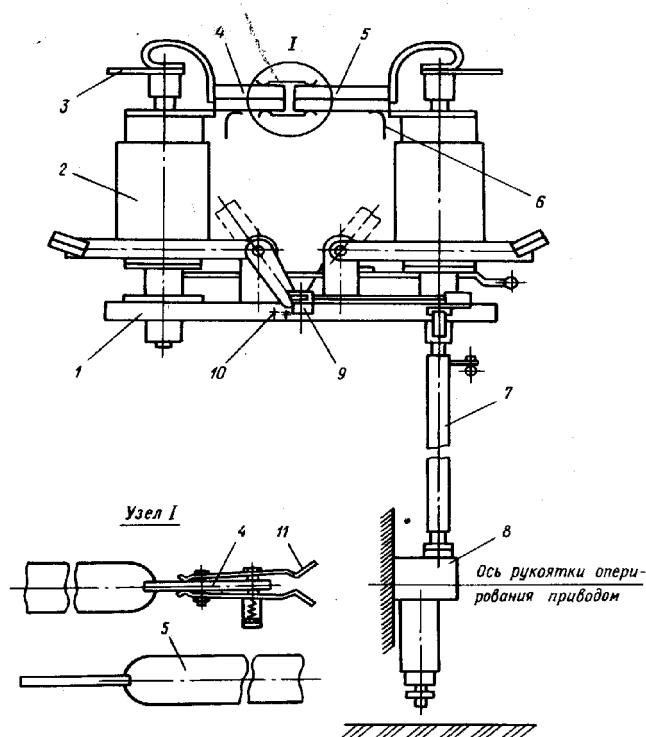


Рис. 86. Ведущий полюс разъединителя 35 кВ, 3200 А:

1-основание; 2 — изолятор; 3 - неподвижный контактный вывод; 4 - подвижный контактный нож с ламелями 11; 5 — подвижный контактный нож без ламелей; 6 — подвесной контакт ножей заземления; 7 - приводной вал; 8 - привод; 9 — контактный вывод заземляющего контура; 10 - болт заземления

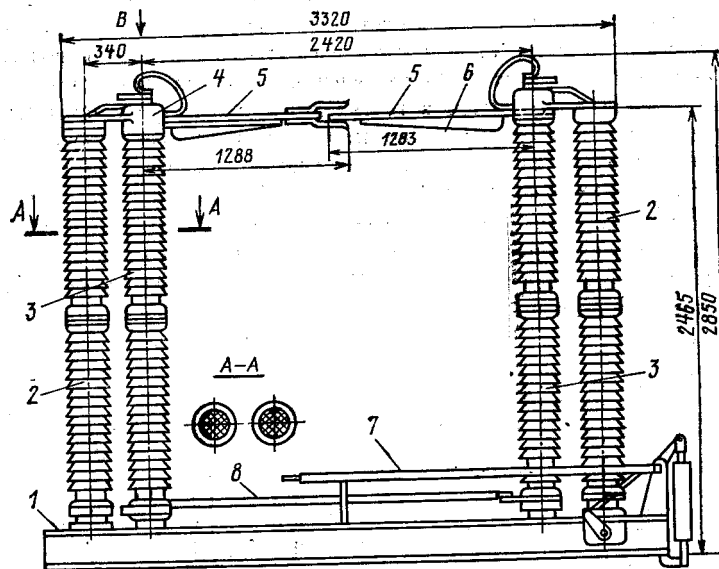


Рис. 87. Разъединитель типа РНДЗ-1

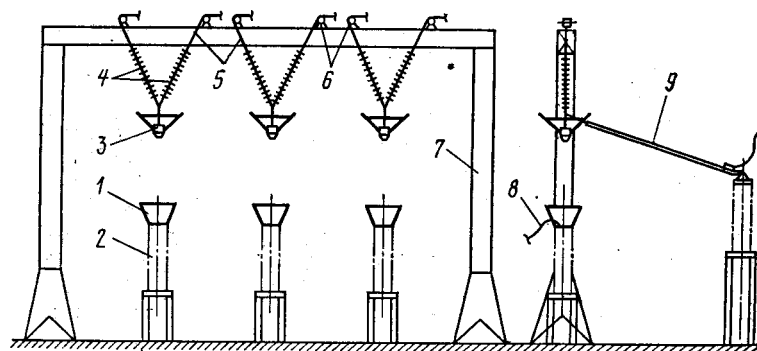


Рис. 88. Подвесной разъединитель:

1 – неподвижный контакт, 2 – изолятор, 3 – подвижный контакт, 4 – гирлянда, 5 – трос, 6 – блок, 7 – портал, 8 – гибкая шина, 9 – труба

21.7 Блокировка разъединителей и выключателей

Отключение разъединителя при прохождении через него номинального тока ведет к тяжелой аварии, иногда с поражением людей. Образующаяся дуга очень подвижна, быстро удлиняется, что ведет к перемыканию полюсов и возникновению КЗ. Во избежание таких последствий разъединители блокируются с выключателями с помощью механических, механических замковых и электромагнитных замковых блокировок.

В первом случае рычаг привода разъединителя оказывается свободным только при отключенном положении механизма выключателя. При такой блокировке очень трудно связать механизм выключателя со многими приводами разъединителей. В каждом отдельном случае приходится конструировать свой блокирующий механизм применительно к конструкции распределительного устройства. В силу этого подобная блокировка применяется редко.

При механической замковой блокировке на выключателе и связанном с ним разъединителе установлены специальные замки, которые могут быть открыты только специальным ключом. Ключ находится в замке, установленном на выключателе. Его можно вынуть из замка только при отключенном состоянии выключателя, т.е. при отсутствии тока через разъединитель. После этого ключ вставляют в замок на приводе разъединителя и освобождают его механизм.

Разъединитель может включаться и выключаться только в том случае, когда ключ находится в его замке. Операции с другими разъединителями при этом невозможны. Таким образом, здесь отсутствует механическая связь приводов выключателя и разъединителей.

Более совершенна электромагнитная замковая блокировка (рис.89). Для операции с

разъединителем ключ в виде электромагнита (рис.89, а) должен быть вставлен в замок (рис.89,б). Концы катушки 2 электромагнита выведены на штыревые контакты 3. Если выключатель, связанный с данным разъединителем, отключен, то через его размыкающие блок-контакты и гнезда 4 подается напряжение на катушку 2. При нажатии на кольцо 1 якорь 5 опускается и под действием электромагнитной силы сцепляется с запирающим ключом плунжером 6. Теперь при движении якоря 5 вверх он будет перемещать связанный с ним плунжер 6. В результате деталь 8 привода разъединителя будет освобождена, а штифты 7 войдут в паз А ключа, не допуская его снятия с замка. Для блокировки всех разъединителей достаточно одного ключа на все распределительное устройство.

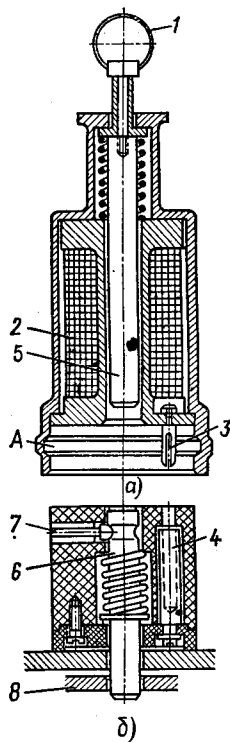


Рис. 89. Электромагнитная блокировка с ключом

21.8 Выбор, применение и эксплуатация разъединителей

1. Номинальное напряжение разъединителя должно соответствовать номинальному напряжению высоковольтной сети.

2. Наибольший длительный ток нагрузки потребителя не должен превышать номинальное значение длительного тока разъединителя.

3. Ударный ток КЗ в месте установки разъединителя не должен превышать допустимую амплитуду ударного тока КЗ разъединителя.

4. Ток термической стойкости I_T в течение времени t_T , гарантированный заводом-изготовителем, и ток КЗ $I_{KЗ}$, протекающий через разъединитель в течение времени $t_{KЗ}$, должны быть связаны соотношением

$$I_T^2 t_T \geq I_{KЗ}^2 t_{KЗ}.$$

5. Внешние условия работы разъединителя должны соответствовать реальным условиям эксплуатации.

22 ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

22.1 Назначение и принцип действия короткозамыкателей и отделителей, физические явления в электрических аппаратах

В настоящее время широко применяются высоковольтные подстанции без выключателей на питающей линии. Это позволяет упростить и удешевить оборудование при сохранении высокой надежности. Для замены выключателей на стороне высокого напряжения используются короткозамыкатели и отделители.

Отделитель предназначен для автоматического отключения поврежденного участка электрической цепи в момент отсутствия в ней тока, т. е. в период бестоковой паузы цикла АПВ выключателя на питающем конце линии. Отделитель представляет собой разъединитель, который быстро отключает обесточенную цепь после подачи команды не его привод. Если в обычном разъединителе скорость отключения мала, то в отделителе процесс отключения длится 0,5 – 0,1 с.

Короткозамыкатель – это быстродействующий контактный аппарат, предназначенный для создания искусственного короткого замыкания сети по сигналу релейной защиты с целью вызвать отключение выключателя, установленного на питающем конце линии.

В качестве примера применения короткозамыкателей и отделителей на рис. 90 приведена схема питания от одной линии двух трансформаторных групп Т. Входной выключатель В2 заменяется отделителем О и короткозамыкателем КЗ.

По схеме рис. 90,а трансформатор Т при повреждении отключается выключателем В2. По схеме рис. 90,б от сигнала защиты замыкается короткозамыкатель КЗ, создавая короткое замыкание на землю, что приводит к срабатыванию выключателя В1 в начале линии. За время бестоковой паузы цикла автоматического повторного включения (АПВ) размыкается отделитель О, отключая поврежденный трансформатор. Выключатель В1 автоматически вновь включается, восстанавливая питание на остальных трансформаторах.

Таким образом, в этой схеме удастся не ставить выключатели на стороне 220 кВ трансформаторов Т. Однако для надежной работы необходима четкая последовательность в работе короткозамыкателей, выключателей и отделителей. Иначе возможны такие тяжелые аварийные случаи, как отключение тока КЗ отделителями и др.

Эффективность такой схемы тем выше, чем больше номинальное напряжение сети. Указанный эффект достигается за счет отсутствия выключателей на стороне 35—220 кВ, а также аккумуляторных батарей и компрессорных установок. Уменьшается площадь подстанции. Создается возможность приближения напряжения 35—220 кВ непосредственно к потребителям. Сокращаются сроки строительства.

По данным, применение отделителей и короткозамыкателей позволяет удешевить стоимость подстанции на 40—50% и практически сохранить ту же надежность.

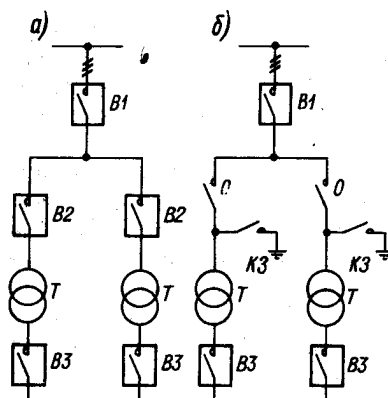


Рис. 91. Схема питания от одной линии двух трансформаторных групп: *а* - схема коммутации с выключателями; *б* – схема замещения выключателя отделителем и короткозамыкателем

22.2 Конструкция короткозамыкателей и отделителей

По конструкции отделители и короткозамыкатели суть разъединители с быстродействующими приводами, управляемыми от системы защиты. Примеры их устройства показаны ниже.

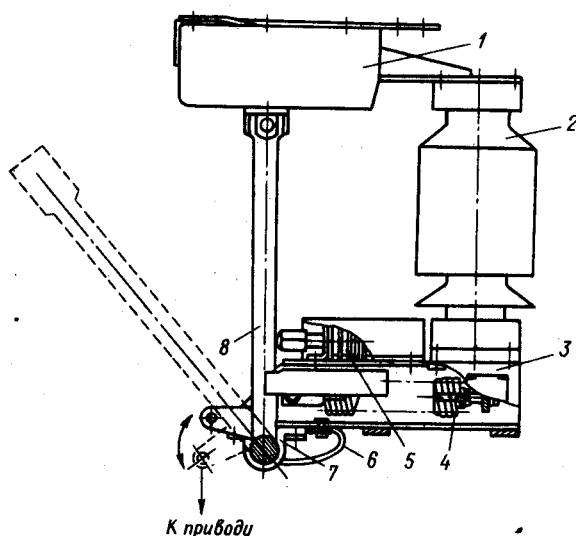


Рис. 92. Общий вид (схема) короткозамыкателя

Короткозамыкатель (рис.92) состоит из основания 3, на котором установлен соответствующий напряжению изолятор 2 с верхним неподвижным контактом 1 (закрит кожухом), снабженным выводом для присоединения к линии электропередачи. Основание 3 заземлено и при помощи гибкой связи 6 соединено с подвижным контактом (ножом) 8. Подвижный контакт вращается на оси 7 и связан с приводом и замыкающей пружиной 4. Привод размыкает контакты (отводит нож) и ставит нож под защелку, взводя при этом пружину. По сигналу от защиты защелка освобождает нож, и под действием пружины контакты замыкаются, таким образом достигается фиксированное быстродействие. Буфер Д служит для амортизации удара в контактах при включении.

Принципиальная схема короткозамыкателя с отделителем приведена на рис.93.

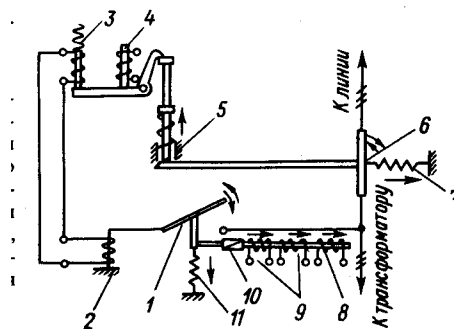


Рис. 93. Принципиальная схема короткозамыкателя с отделителем:

1 — короткозамыкатель; 2 — трансформатор тока; 3 — реле, блокирующее (не разрешающее) отключение отделителя до момента прекращения тока короткого замыкания; 4 — электромагнит для оперативного отключения отделителя; 5 — защелка, удерживающая отделитель во включенном положении; 6 — отделитель; 7 — отключающая пружина отделителя; 8 и 9 — электромагниты управления защелкой короткозамыкателя; 10 — защелка, удерживающая короткозамыкатель в отключенном положении; 11 — включающая пружина короткозамыкателя

В основу конструкции отделителя ОД-110У на 110 кВ (рис.93) положен двухколонковый разъединитель с вращением ножей 1 в горизонтальной плоскости. Приведение в движение колонок 2 осуществляется пружинным приводом 3 с электромагнитным управлением. Во включенном положении пружины привода заведены. При подаче команды пружина освобождается и контакты расходятся за время 0,4—0,5 с.

Описанные выше конструкции короткозамыкателей и отделителей имеют большое время срабатывания (0,5—1 с), что удовлетворяет современные требования к энергосистемам. В перспективе это время должно быть уменьшено до 0,08—0,12 с при напряжениях до 220 кВ. Рассмотренные аппараты не обеспечивают также достаточную надежность работы при гололеде и сильных морозах. Для уменьшения времени включения замыкателя и времени отключения отделителя необходимо сокращать междуконтактное изоляционное расстояние путём применения элегазовой или вакуумной среды. Более перспективным является использование элегазовых аппаратов, так как удастся получить необходимую прочность при одном разрыве. Для вакуумных аппаратов необходимо включение нескольких разрывов последовательно.

На рис.95 представлен элегазовый короткозамыкатель на напряжение 110 кВ. В фарфоровом цилиндре 1 установлены контакты 2 и 3. Давление элегаза в цилиндре составляет 0,3 МПа. Привод подвижного контакта 3 осуществляется тягой 5. Стальной сильфон 4 обеспечивает герметизацию полости цилиндра 1. Расстояние между контактами 85—110 мм. Время срабатывания в 4—5 раз меньше, чем у существующих короткозамыкателей открытого типа. Короткозамыкатель защищён от климатических воздействий окружающей среды.

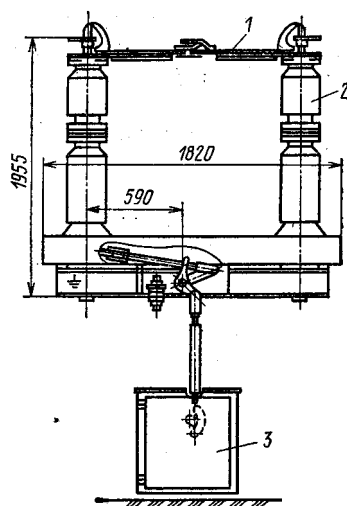


Рис. 94. Отделитель

На рис.95 представлен элегазовый короткозамыкатель на напряжение 110 кВ. В фарфоровом цилиндре 1 установлены контакты 2 и 3. Давление элегаза в цилиндре составляет 0,3 МПа. Привод подвижного контакта 3 осуществляется тягой 5. Стальной сильфон 4 обеспечивает герметизацию полости цилиндра 1. Расстояние между контактами 85—110 мм. Время срабатывания в 4—5 раз меньше, чем у существующих короткозамыкателей открытого типа. Короткозамыкатель защищён от климатических воздействий окружающей среды.

22.3 Основные параметры

Параметры отечественных и зарубежных короткозамыкателей и отделителей приведены в справочниках.

22.4 Выбор короткозамыкателей и отделителей

1. Номинальное напряжение короткозамыкателя должно соответствовать номинальному значению напряжения сети.
2. Динамическая и термическая стойкости короткозамыкателя должны соответствовать току КЗ в месте его установки.
3. Время включения короткозамыкателя должно соответствовать требованиям схемы автоматики.
4. Номинальные данные по току и напряжению отделителя выбираются так же, как и для разъединителя. Кроме того, время отключения должно соответствовать требованиям схемы автоматики.

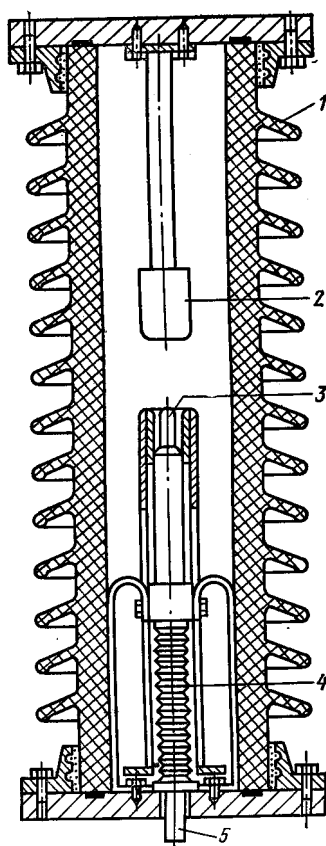


Рис.95. Элегазовый короткозамыкатель $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$

23 ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ РЕАКТОРЫ

23.1 Назначение, область применения и принцип работы реактора, физические явления в электрическом аппарате

Реактор-это ЭА в виде катушки с постоянным индуктивным сопротивлением $X=\omega L$, предназначенный для ограничения ударного тока КЗ в мощных сетях и поддержания напряжения на шинах при аварийном режиме.

Реакторы устанавливаются на отходящих фидерах (1 и 2) рис. 96 и между секциями сборных шин 3.

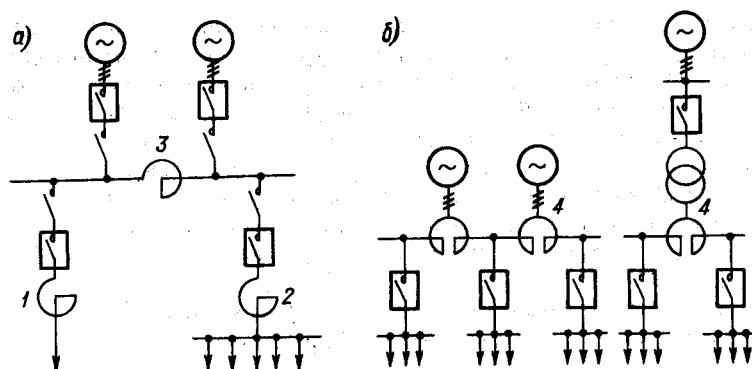


Рис. 96. Схемы включения токоограничивающих реакторов:
1 - фидерный; 2- фидерный групповой; 3 – межсекционный; 4 - сдвоенный.

Распределение напряжений в цепи с реактором показано на рис. 97.

Следует отметить, что при номинальном режиме потери напряжения на реакторе ΔU_{ϕ} не равны численно падению напряжения U_p на нем (рис. 97, а и б) и существенно зависят от величины $\cos \varphi$ ($\Delta U_{\phi} \rightarrow 0$ при $\cos \varphi = 1$; $\Delta U_{\phi} = U_p$ при $\cos \varphi = 0$; $\Delta U_{\phi} \approx 5U_p$ при $\cos \varphi = 0,8$). Таким образом, при нормальном режиме обеспечивается допустимое (3-4%) отклонение напряжения у потребителей. При КЗ $\cos \varphi \rightarrow 0$ и большая часть напряжения приходится на реактор (рис. 97,б), вследствие чего на сборных шинах поддерживается высокое остаточное напряжения, значение которого зависит от соотношения сопротивления сети до реактора и самого реактора.

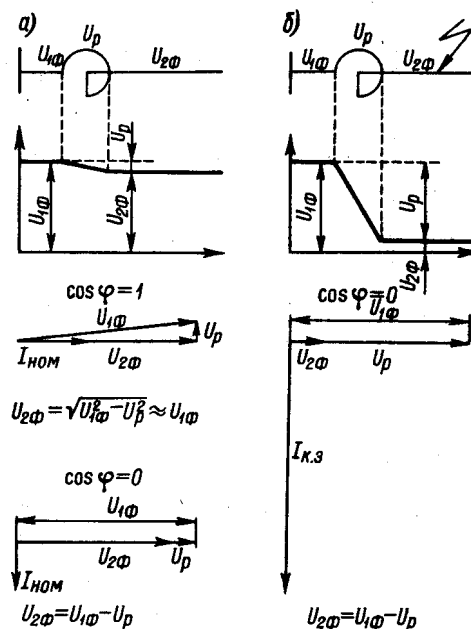


Рис. 97. Распределение напряжений в цепи с реактором:
а) при номинальном токе, б) при КЗ

23.2 Основные параметры реактора

Основными параметрами реактора являются:

- 1) $U_{ном}$;
- 2) $I_{ном}$;
- 3) реактивное (индуктивное) сопротивление X_p , равное отношению падения напряжения на реакторе U_p при протекании по нему $I_{ном}$ к фазному напряжению U_ϕ .

$$X_p = \frac{I_{ном} \omega L}{U_\phi} = \frac{U_p}{U_\phi} = \frac{U_p \sqrt{3}}{U_\Delta} \cdot 100.$$

Индуктивное сопротивление фидерных реакторов выбирается обычно 6-8%, а секционных 8-12 %.

- 4) Ток термической стойкости I_t для времени t ;
- 5) Ток динамической стойкости $i_{уд}$

$$i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{кз.р},$$

где $I_{кз.р}$ - наибольший ток, проходящий через реактор.

$$I_{кз.р} = I_{ном.р} 100/X_p\%.$$

23.3 Бетонные реакторы

На U до 35 кВ и для внутренней установки распространение получили бетонные реакторы. Бетонный реактор выполняется в виде концентрически расположенных витков 1 из специального круглого изолированного многожильного провода, залитых в радиально расположенные бетонные колонки 2. Число колонок определяется диаметром намотки. Охлаждение реакторов, как правило, естественное. Каждая колонка реактора устанавливается на опорные изоляторы 3.

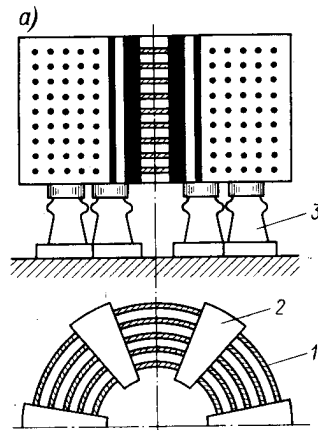


Рис. 98. Общий вид фазы бетонного реактора (а) и трёхфазный комплект реактора (б):
1 – витки, 2 – бетонные колонки, 3 – опорные изоляторы

23.4 Масляные реакторы

На $U > 35$ кВ и для наружного использования распространение получили масляные реакторы (рис. 7.4.4). Обмотки 3 из медных проводов, изолированных кабельной бумагой, укладываются на изоляционные цилиндры 4 и размещаются в баке 2, заливаемом маслом, концы обмотки каждой фазы выводятся через проходные изоляторы 1 наружу. Масло служит изолирующей и охлаждающей жидкостью.

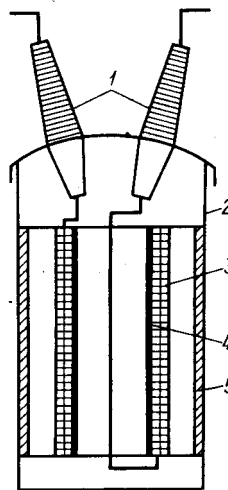


Рис. 11-5. Общий вид фазы масляного реактора

Рис. 99. Общий вид фазы масляного реактора:

1 – проходные изоляторы, 2 – бак, 3 – обмотки, 4 – изоляционные цилиндры, 5 – электромагнитные экраны

23.5 Сдвоенные реакторы

Получили распространение сдвоенные реакторы 4 (с целью уменьшение потерь напряжения на радиаторе в номинальном режиме, упрощения и удешевления распреустройств). Совмещение в одном радиаторе двух уменьшает габариты аппарата, удешевляет и упрощает распреустройство. Такой реактор имеет два фидера. Катушки каждой фазы включены так, что создаваемые ими потоки направлены встречно и оказывают размагничивающее воздействие друг на друга. В результате индуктивное сопротивление ветви падает. Соответственно уменьшается падение напряжения на реакторе.

Основные параметры сдвоенного реактора:

- 1) Номинальный длительный ток каждой ветви;
- 2) Индуктивное сопротивление одной ветви
- 3)

$$X_p\% = \frac{I_{НОМ.Р} X_{Р.В} \sqrt{3}}{U_{НОМ}} \cdot 100.$$

- 3) Коэффициент связи $k = \omega M / X_{р.в.} = M / L_{р.в.}$;

где M – масса реактора;

- 4) Электродинамическая стойкость каждой ветви;
- 5) Термическая стойкость каждой ветви.

23.6 Выбор, применение и эксплуатация реакторов

Генератор G питает сборные шины 1 , от которых отходят линии 2 к потребителю. За выключателем $QF2$ установлен реактор L .

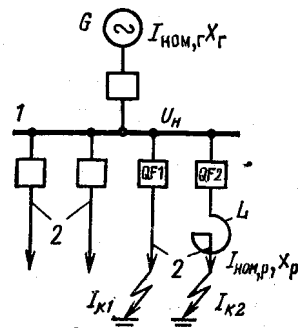


Рис. 100. Схема к расчёту реактора:

1 – сборные шины, 2 – линии к потребителям

1. Необходимо отметить, что выключатель $QF1$ должен быть выбран по току КЗ $I_{К1}$

$$I_{К1} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} X_Г}.$$

Ток КЗ в линии с реактором определяется суммарным сопротивлением генератора и реактора

$$I_{К2} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} (X_Г + X_Р)}.$$

2. Длительный ток реактора выбирается равным току линии

$$I_{НОМ.Р} \leq I_{НОМ.Г}$$

3. При расчете термической и электрической стойкости реактора за основу берется наибольший ток, проходящий через реактор (ток КЗ).

Если $X_p\% > 3\%$, то

$$I_{КЗ.Р} = I_{НОМ.Р} \text{ кт } \frac{100}{X_p\%},$$

где $X_p\%$ – относительное индуктивное сопротивление реактора;

Если $X_p\% < 3\%$, то при расчете тока КЗ желательно учитывать сопротивление источника питания X_g .

4. Механическая прочность реактора характеризуется ударным током электродинамической стойкости. При расчете электродинамической стойкости за основу берется ударный ток

$$i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{кз.р}.$$

5. Одним из основных параметров реактора является его индуктивность L_p .

$$L_{p.} = \frac{10 U_{ном} X_p}{I_{ном.р} 2\pi f \sqrt{3}}.$$

Т.о, при работе реактора необходимо определить его основные параметры: $U_{ном.р}$, $I_{ном.р}$, $X_p\%$, $i_{уд} 1$, ток термической стойкости $I_{кз.р}$.

24 РАЗРЯДНИКИ И ОГРАНИЧИТЕЛИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

24.1 Назначение, область применения разрядников

Разрядник – это ЭА, искровой промежуток которого пробивается при определённом значении приложенного напряжения, ограничивая тем самым перенапряжения в установке.

Разрядники предназначены для защиты электроустановок от коммутационных и атмосферных импульсов перенапряжений, существенно превышающих номинальные.

24.2 Требования, предъявляемые к разрядникам

К разрядникам предъявляются следующие требования.

1. Вольт-секундная характеристика разрядника должна идти ниже характеристики защищаемого объекта и должна быть более пологой.
2. Искровой промежуток разрядника должен иметь определённую гарантированно электрическую прочность при промышленной частоте (50 Гц) и при импульсах.
3. Остающееся напряжение на разряднике, характеризующее его токоограничивающую способность, не должно достигать опасных для изоляции оборудования значений.
4. Сопровождающий ток частотой 50 Гц должен отключаться за минимальное время.
5. Разрядник должен допускать большое число срабатываний без осмотра и ремонта.

24.3 Основные параметры разрядников

Основными параметрами разрядника являются:

- 1) вольт-секундная характеристика;
- 2) остающееся напряжение;
- 3) сопровождающий ток.

Вольт-секундная характеристика – это зависимость максимального напряжения импульса от времени разряда.

Основным элементом разрядника является *искровой промежуток*. Вольт-секундная характеристика этого промежутка (кривая 1) должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемого оборудования (кривая 2).

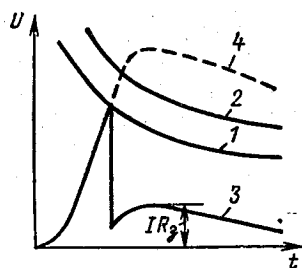


Рис. 101. Согласование характеристик разрядника и защищаемого оборудования:
1 – характеристика искрового промежутка, 2 – вольт-секундная характеристика изоляции оборудования, 3 – ограниченное разрядником перенапряжение

При возникновении перенапряжения (кривая 5) искровой промежуток разрядника пробивается раньше (точка O), чем изоляция оборудования. После пробоя линия (сеть) заземляется через сопротивление разрядника. При этом напряжение на линии определяется значением тока I через разрядник, сопротивлением разрядника и заземления R_3 .

Падение напряжения на разряднике при протекании тока данного значения и формы

называется *остающимся напряжением*. Чем меньше это напряжение, тем лучше качество разрядника.

После пробоя разрядника от импульса напряжения его искровой промежуток ионизирован и легко пробивается фазным напряжением. Возникает КЗ на землю, и через разрядник протекает ток промышленной частоты, который называется *сопровождающим*. Чтобы избежать срабатывания защиты и отключения оборудования, разрядник должен отключать сопровождающий ток в возможно малые сроки (примерно полупериод промышленной частоты).

24.4 Конструкции разрядников, физические явления в электрических аппаратах

Конструкции и параметры отечественных и зарубежных разрядников приведены в справочниках по электрическим сетям и электрооборудованию.

24.5 Трубчатые разрядники, физические явления в электрическом аппарате

При нормальной работе установки разрядник заземлен от линии воздушным промежутком S_2 .

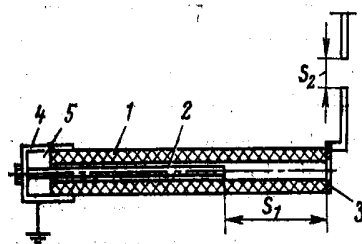


Рис. 102. Трубчатый разрядник:

1 - трубка; 2- электроды; 3 - кольцевой электрод; 4 - заземленный электрод; 5 - буферный объем

При возникновении перенапряжения пробиваются оба промежутка S_1 и S_2 и импульсный ток отводится в землю. Возникающая в трубке дуга вызывает сильную газогенерацию из стенок трубки. Газы устремляются через выхлопные отверстия в кольцевом электроде 3, образуя интенсивное продольное дутье, которое гасит дугу при прохождении ток через нуль, одновременно гаснет дуга и на промежутке S_2 . Отключение сопровождается большим выбросом пламени и газов. Предельный отключаемый ток определяется прочностью трубки и, например для разрядников серии РТВ на 6-10 кВ составляет 12 кА. Предельные токи отключения разрядников с фибробакетовыми трубками меньше, чем у разрядников с винипластовыми трубками.

24.6 Вентильные разрядники, физические явления в электрическом аппарате

Вентильные разрядники. Вентильные разрядники выполняются на U до 220 кВ и предназначены для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных перенапряжений. Они применяются в открытых и закрытых электроустановках частотой 50 Гц. Разрядник (рис. 103) состоит из двух основных частей : блока искровых промежутков, в который входит несколько последовательно соединенных единичных искровых промежутков, шунтированных подковообразными нелинейными резисторами, предназначенными для выравнивания распределения напряжения, и рабочего резистора, составленного из набора последовательно включенных виниловых дисков. Искровые промежутки заключены в фарфоровые цилиндры.

Блок искровых промежутков соединен последовательно с рабочим резистором, закрыт фарфоровым кожухом и герметизирован резиной.

Разрядник работает следующим образом. При возникновении перенапряжения

пробиваются искровые промежутки и импульсный ток через рабочий резистор уходит в землю. Сопровождающий ток ограничивается рабочим резистором до значения, при котором дуга может быть погашена искровыми промежутками. единичный промежуток способен отключить ток 80-100 А при действующем восстанавливаемом напряжении 1-1,5 кВ. Число искровых промежутков и число дисков резистора выбирается исходя из указанных условий. Дуга при этом гаснет за один полупериод.

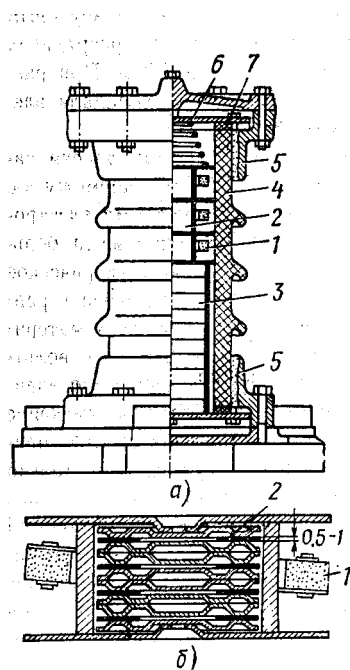


Рис. 103. Вентильный разрядник (а) и его искровые промежутки (б):
1 – вилитовые кольца, 2 – искровые промежутки, 3 – рабочие резисторы, 4 – фарфоровый кожух, 5 – фланцы

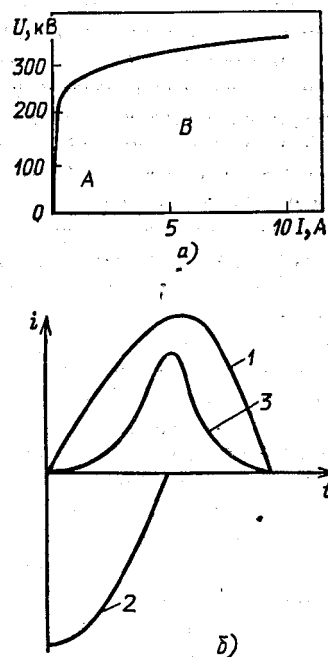


Рис. 104. Вольт-амперная характеристика вилитового резистора:
1 – напряжение источника 50 Гц, 2 – кривая тока цепи, определяемого индуктивным сопротивлением, 3 – кривая тока, определяемого рабочим резистором

Вентильные разрядники работают бесшумно и без каких-либо выбросов газов и пламени.

Разрядники на 3,6 и 10 кВ отличаются друг от друга только числом искровых промежутков и количеством вилитовых резисторов, а также габаритами.

Разрядники многовентильные (РМВГ). Эти разрядники выполняются на номинальные напряжения 150-500 кВ. Они комплектуются из стандартных блоков (на 30 кВ) с магнитными искровыми промежутками и соответствующего числа дисков вилитовых резисторов.

По сравнению с обычными искровыми промежутками пропускная и дугогасительная способность магнитного искрового промежутка много выше.

24.7 Разрядники постоянного тока, физические явления в электрическом аппарате

Разрядники выполняются с устройствами для гашения дуги. Так, магнитные разрядники постоянного тока серии РМБВ состоят из искровых промежутков с дугогасительной камерой, блока рабочего вилитового резистора и дугогасительного искрового промежутка с постоянным магнитом. Конструктивно они выполняются аналогично вентильным разрядникам.

Магнитные разрядники типа РА21-2 - разрядник многократного действия с пониженным давлением внутри корпуса, предназначен для защиты от перенапряжения обмоток возбуждения синхронных машин. Разрядник имеет диапазон регулирования уставки по пробивному напряжению 1200-3500 В (амплитудное значение) и позволяет пропускать ток до 5000А при среднем значении тока в течении 1с до 1000 В постоянного тока.

24.8 Ограничители перенапряжения, физические явления в электрических аппаратах

ОПН выпускаются на широкую гамму напряжений – от 0,04 кВ до 500 кВ.

На основе оксида цинка, имеющего резко выраженную нелинейность вольт-амперной характеристики, разработана серия нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) на номинальное напряжение 110—500 кВ.

ОПН представляет собой нелинейный резистор с высоким коэффициентом нелинейности $\alpha=0,04$ (против 0,1—0,2 для вилита). Он включается параллельно защищаемому объекту (между потенциальным выводом и землей) без разрядных промежутков. Благодаря высокой нелинейности при номинальном фазном напряжении через ОПН протекает ничтожный ток 1 мА. При увеличении напряжения сопротивление ОПН резко уменьшается, ток, протекающий через него, растет. При напряжении $2,2U_{\phi}$ через ОПН протекает ток 10^4 А. После прохождения импульса напряжения ток в цепи ОПН определяется фазным напряжением сети.

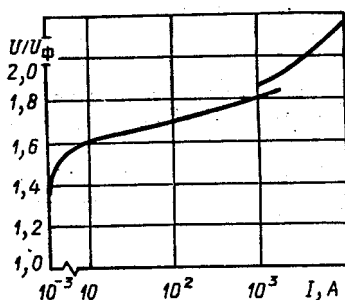


Рис. 105. Вольт-амперная характеристика ограничителя ОПН-500

ОПН ограничивают коммутационные перенапряжения до уровня $1,8 U_{\phi}$ и атмосферные перенапряжения до $(2-2,4) U_{\phi}$. Из вольт-амперной характеристики ОПН-500 (рис. 105) видно, что при снижении перенапряжений с $2 U_{\phi}$ до U_{ϕ} ток, протекающий через резисторы, уменьшается в 10^6 раз. Сопровождающий ток, протекающий после срабатывания аппарата, невелик (миллиамперы), так же как и невелика мощность, выделяемая в резисторах. Это позволяет отказаться от последовательного включения нескольких искровых промежутков и дает возможность присоединять ОПН непосредственно к защищаемому оборудованию, что значительно повышает надежность работы.

Высокая нелинейность резисторов ОПН (для области больших токов $\alpha=0,04$) позволяет значительно снизить перенапряжения и уменьшить габариты оборудования, особенно при напряжении 750 и 1150 кВ.

Габаритные размеры и масса ОПН намного меньше, чем у обычных вентильных разрядников того же класса напряжения.

24.9 Выбор разрядников

Выбор разрядников и ограничителей напряжения.

Трубчатые разрядники.

1. Номинальное напряжение разрядника $U_{\text{ном.разр}}$ должно соответствовать номинальному напряжению сети $U_{\text{ном.сети}}$.

2. Токи короткого замыкания, возникающие при срабатывании разрядника, должны находиться в пределах токов, отключаемых разрядником.

3. Искровые промежутки S_1 и S_2 берутся в соответствии с данными табл. справочника.

Вентильные разрядники и ограничители перенапряжения.

1. Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ разрядника или ограничителя перенапряжения должно быть равно номинальному напряжению сети $U_{\text{ном.сети}}$.

2. Расстояние до защищаемого объекта выбирается в зависимости от номинального напряжения сети, схемы установки и типа разрядника в соответствии с ПУЭ.

25 ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

25.1 Назначение предохранителей

При напряжении выше 3 кВ и частоте 50 Гц применяют высоковольтные предохранители. Процесс нагрева плавкой вставки в высоковольтных предохранителях протекает так же, как и предохранителях низкого напряжения.

25.2 Требования, предъявляемые к предохранителям ВН

1. В отношении времени плавления к высоковольтным предохранителям предъявляется следующее общее требование: длительность плавления вставки должна быть менее 2ч при токе перегрузки, равном $2I_{ном}$, и более 1ч при токе перегрузки равном $1,3 I_{ном}$.

2. Высоковольтные предохранители часто применяются для защиты трансформаторов от токов КЗ. Ток, текущий через предохранители в номинальном режиме не превышает доли ампера. В таких предохранителях время плавления вставки равно 1 мин при токе 1,25 - 2,5 А.

3. В связи с высоким значением восстанавливающегося напряжения процесс гашения дуги усложняется. В связи с этим изменяются габаритные размеры и конструкция высоковольтных предохранителей.

25.3 Принцип действия, устройство и основные параметры предохранителей ВН, физические явления в электрических аппаратах

Назначение и принцип работы предохранителей ВН такие же, как и предохранителей НН. Основная трудность создания предохранителей ВН - гашение дуги. В современных конструкциях применяется главным образом гашение в узких каналах при высоком давлении (предохранители с мелкозернистым наполнителем) гашение при помощи автогазового и жидкостного дутья. Наибольшее распространение получили предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.

25.4 Предохранители с мелкозернистым наполнителем серий ПК и ПКТ

Они выполняются на напряжения 3; 6,3; 10 и 35 кВ и номинальные токи 400, 300, 200 и 40 А соответственно. Небольшая разрывная способность 200 МВ А для силовых предохранителей и 1000 МВ-А и более (не ограничено) у предохранителей (серия ПКТ) на малые токи для защиты цепей измерительных трансформаторов напряжения. Такая высокая отключающая способность достигается токоограничивающим эффектом. Полное время отключения силовыми предохранителями тока короткого замыкания достигает 0,005 — 0,007 с. Предохранители предназначены для внутренней и наружной установки.

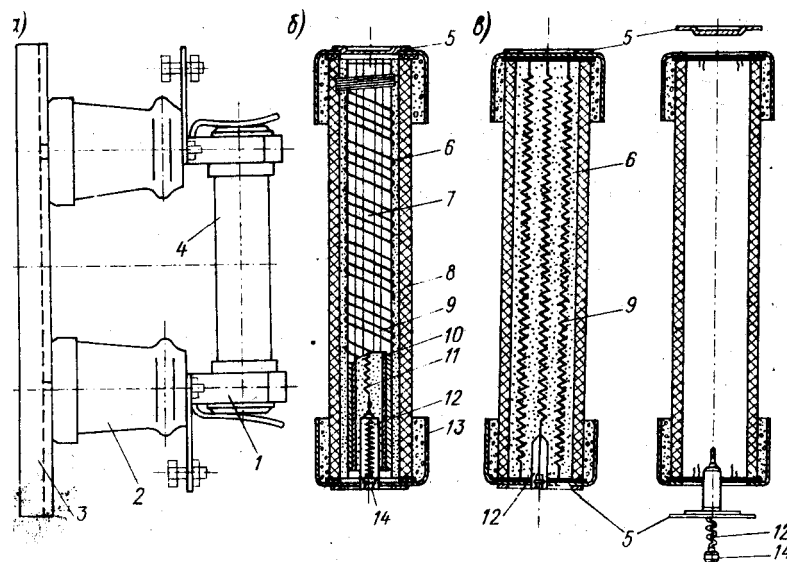


Рис.106. Предохранители серии ПК: *а* — общий вид; *б* — патрон с плавкой вставкой на керамическом сердечнике; *в* — патрон со спиральными плавкими вставками

Предохранитель (рис.106) состоит из контактных стоек 1, укрепленных через соответствующие изоляторы 2 на стальном основании 3, и патрона 4. Патрон состоит из изоляционного корпуса 8, армированного по концам латунными колпачками 13 и закрытого герметично с обеих сторон крышками 5. Внутри патрона размещаются плавкие вставки 7. Весь объем заполнен кварцевым песком 6. Перегорание предохранителя сигнализируется якорем 14, который после перегорания удерживающей его стальной указательной вставки 11 выталкивается пружиной 12.

На малые токи плавкая вставка выполняется в виде намотки из тонких проволок 9 на керамическом сердечнике 10. На большие токи плавкие вставки выполняются в виде отдельных спирально свитых проволок 9 (рис.106,б). Проволоки медные, посеребренные либо константановые. Такая форма вставок обусловлена стремлением разместить достаточно длинную вставку, в патроне ограниченной длины. Длина плавкой вставки (в миллиметрах) для этих предохранителей составляет

$$l = 160 + 70U_{\text{ном}},$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение, кВ.

Для снижения температуры предохранителя при небольших перегрузках на места скрутки плавких вставок напаяны оловянные шарики. На токи 7,5 А и ниже для ограничения перенапряжений вставки имеют переменное сечение. Разное время перегорания отдельных участков приводит к снижению перенапряжений при отключении.

25.5 Предохранители серии ПКНТ

Предохранители серии ПКНТ на напряжение U до 35 кВ имеют внутри керамический каркас с тонкой плавкой вставкой. Так как номинальный ток вставок $I_{\text{ном}} < 1\text{А}$, то сечение вставки мало и токоограничивающий эффект особенно велик. Плавкая вставка выполняется из константановой проволоки с 4-х ступенчатым сечением для ограничения перенапряжений. Плавление вставки происходит последовательно по ступеням. Предохранитель обеспечивает защиту шин ВН от повреждения трансформатора напряжения при любой мощности источника питания (ток ограничивается предохранителем).

Предохранители серий ПК и ПКНТ работают бесшумно без выброса пламени и раскаленных газов.

Для нормальной работы предохранителей особо важное значение имеет герметизация. При проникновении влаги в предохранитель он теряет свойство дугогашения. Поэтому места пайки и цементирующая замазка, крепящая колпачки, окрашиваются специальной влагозащитной

эмалью. Перезарядка предохранителя в эксплуатации не допускается.

Как правило, установки напряжением 35 кВ и выше работают на открытом воздухе и подвержены воздействию атмосферы. В этих условиях трудно обеспечить надежную работу предохранителя ПК из-за увлажнения наполнителя. Характеристики кварцевых предохранителей ВН приведены в справочниках.

Перспективы дальнейшего развития предохранителей на $U > 35$ кВ осложняются технологическими трудностями изготовления и ростом их габаритов.

25.6 Предохранители с автогазовым, газовым и жидкостным гашением дуги

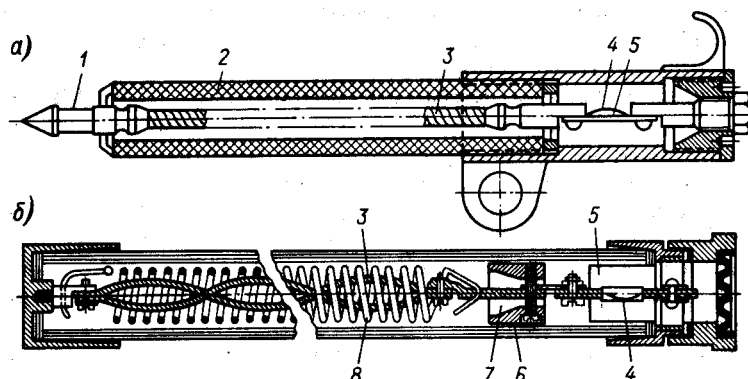


Рис. 107. Предохранители с автогазовым (а) и жидкостным (б) гашением

Эти предохранители (рис.107) выполняются с короткой плавкой вставкой. Плавкая вставка состоит из медной 4 (токоведущей) и стальной 5 (удерживающей) частей. После расплавления (перегорания) вставки (сначала медной части, а затем стальной) дуговой промежуток удлиняется с помощью пружин или давления образующихся газов. Дуга втягивается в дугогасящую или газогенерирующую среду и под действием газового или жидкостного дутья гаснет.

В стреляющем предохранителе (тип ПСН — рис. 107, а) вытягивание гибкой связи 3 из патрона осуществляется пружиной ножа, связанного с контактным наконечником 1. Дуга, втянутая в газогенерирующую трубку 2, резко повышает давление в трубке (до 10—12 МПа) и создает весьма интенсивное продольное автодутье. Гибкая связь окончательно выбрасывается из патрона, дуга энергично гасится. Гашение сопровождается выбросом раскаленных газов, световым и звуковым эффектом.

В жидкостном предохранителе (рис. рис. 107, б) пружина 8, растягивая дуговой промежуток, тянет поршень 6 и проталкивает через отверстия 7 жидкость, заполняющую весь объем под поршнем. Создаваемое интенсивное продольное дутье надежно гасит дугу.

Автогазовое и жидкостное гашение позволяет создать конструкции предохранителей на напряжения 110 — 220 кВ с высокой отключающей способностью.

25.7 Выбор, применение и эксплуатация предохранителей ВН

1. При определении $I_{ном}$ вставки необходимо исходить из условия максимальной длительной перегрузки.

2. Очень часто обмотка высокого напряжения трансформатора присоединяется через предохранитель. При подаче напряжения на трансформатор возникают пики намагничивающего тока, среднее значение амплитуды которых достигает 10 $I_{ном}$, а длительность прохождения равна $\sim 0,1$ с. Выбранный по $I_{ном}$ предохранитель должен быть проверен на прохождение в течении 0,1 с начального намагничивающего тока.

3. В заключении необходимо проверить селективность работы предохранителя с выключателями, установленными на стороне высокого и низкого напряжения.
4. При КЗ в самом трансформаторе время отключения предохранителя должно быть меньше, чем выдержка времени выключателя, установленного на стороне ВН и ближайшего к предохранителю.
5. При КЗ на стороне НН предохранитель должен иметь время плавления больше, чем уставка защиты выключателя на стороне НН
6. При выборе предохранителя необходимо соблюсти также соотношения

$$U_{\text{ном. пред}} = U_{\text{ном. уст}}$$

$$I_{\text{отк. пред}} \geq I_{\text{кз. уст}}$$

Список литературы

Основная литература

1. Электрические и электронные аппараты. В 2 т., Т.1 Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Е.Г. Акимов и др.]; под. ред. А.Г. Гожжелло, Ю.К. Розанова. – М.: Издательский центр «Академия», 2011 – 352 с.
2. Электрические и электронные аппараты. В 2 т., Т.2 Силовые электронные аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений / [А.П. Бурман и др.]; под. ред. Ю.К. Розанова. – М.: Издательский центр «Академия», 2012 – 320 с.
3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2006. 400 с.

2 Дополнительная литература

1. В.М.Степанов, В.С.Косырихин. Электронные аппараты электропитающих систем и электропривода: учебно-методическое пособие / Тула: изд-во ТулГУ, 2011. – 224с.
2. В.М.Степанов, В.С.Косырихин. Средства коммутации электрической энергии: учеб.-методич. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 185с.: ил.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: с последними изменениями. Москва, Ростов н/Д: ИКЦ «МарТ», 2006.- 272 с.
4. Правила устройства электроустановок.- 6-е и 7-е изд. с изм. и доп.- Новосибирск: Сибирское университет. изд-во, 2007.- 854 с.
(1 экз)