

В.М. Сандалов
А.Б. Святых
Ю.С. Сергеев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ



В.М. Сандалов, А.Б. Святых, Ю.С. Сергеев

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И
ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ**

Учебное пособие

2012

УДК 621.316.37(076)
С 181

*Одобрено учебно-методической комиссией
филиала ЮУрГУ в г. Златоусте*

Рецензенты:
В.Л. Федяев, В.Ф. Пепеляев

В.М. Сандалов
С 181 Электрические и электронные аппараты (конспект лекций): учебное пособие / В.М. Сандалов, А.Б. Святых, Ю.С. Сергеев – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. – 105 с.

В учебном пособии описаны принципы работы и конструкции электрических аппаратов различного назначения. Рассмотрены механизмы образования электрической дуги и основные способы ее гашения.

Также в пособии содержатся основные рекомендации по выбору электрических аппаратов подстанций.

Учебное пособие предназначено для студентов 4-6 курсов всех специальностей и форм обучения, изучающих дисциплину «Электрические и электронные аппараты», а также может быть использовано в дипломном проектировании.

УДК 621.316.37(076)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2012
© В.М. Сандалов, А.Б. Святых, Ю.С. Сергеев

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
1.1 Основные определения	6
1.2 Классификация электрических аппаратов	7
1.3 Защитные оболочки электрических аппаратов	8
1.4 Воздействие механических и климатических факторов на электрические аппараты.....	8
2 ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ	
2.1 Электрическая дуга	9
2.1.1 Энергетический баланс дуги.....	13
2.1.2 Дуга постоянного тока	14
2.1.3 Дуга переменного тока	18
2.2 Способы гашения дуги.....	19
3 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
3.1 Электродинамическая стойкость электрических аппаратов.....	23
3.1.1 Методы расчета ЭДУ	23
3.1.2 Усилия между параллельными проводниками	25
3.1.3 Усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники	26
3.1.4 Усилие в витке, катушке и между катушками	27
3.1.5 Электродинамические усилия при переменном токе. Динамическая стойкость аппаратов	30
3.2 Термическая стойкость электрических аппаратов.....	33
3.2.1 Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности 33	
3.2.2 Режимы нагрева электрических аппаратов	34
3.2.3 Нагрев аппаратов при коротком замыкании	36
3.2.4 Термическая стойкость аппаратов.....	37
4 Электрические контакты	
4.1 Общие сведения	38
4.2 Режимы работы контактов.....	40
4.3 Материалы контактов.....	44
4.4 Конструкция твердометаллических контактов	45
4.5 Жидкометаллические контакты	47
5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ АВТОМАТИКИ, УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	
5.1 Электрические аппараты высокого напряжения (ВН)	
5.1.1 Коммутационные и измерительные аппараты ВН. Силовые трансформаторы	49
5.1.2 Выключатели нагрузки	61
5.1.3 Разъединители, отделители, короткозамыкатели	61

5.1.4	Блокировка разъединителей и выключателей.....	65
5.1.5	Отделители и короткозамыкатели.....	65
5.2	Измерительные аппараты	67
5.2.1	Оптоэлектронные ТТ и ТН.....	71
5.2.2	Оптоэлектронный трансформатор напряжения	72
6	КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ	
6.1	Контакты.....	73
6.2	Магнитные пускатели	75
7	ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ	76
8	ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ	
8.1	Классификация реле	78
8.2	Реле для защиты энергосистем	80
8.3	Реле тока и напряжения для управления и защиты электропривода ..	81
8.4	Реле защиты электропривода	81
8.5	Поляризованные реле.....	82
8.6	Тепловые реле	83
8.7	Позисторная защита двигателей	84
8.8	Выбор реле	85
8.9	Электромеханические реле времени	86
8.10	Реле времени с механическим замедлением.....	86
9	ДАТЧИКИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	88
9.1	Контактные датчики.....	89
9.2	Бесконтактные датчики.....	90
10	МУФТЫ	
10.1	Индукционные муфты.....	96
10.2	Электромагнитные муфты.....	97
11	АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ.....	101
	Библиографический список.....	105

ВВЕДЕНИЕ

Электрические аппараты занимают важное место в современной электроэнергетике, а также во многих других отраслях народного хозяйства, поскольку являются как бы «ключом» к осуществлению электроснабжения.

Без электрических аппаратов невозможна работа электрических станций, подстанций, и производства, так как электрические аппараты являются их неотъемлемой частью. На электрических станциях это – различного рода элементы систем защит и автоматики для осуществления контроля и регулирования процесса производства электрической энергии. На подстанциях – это различная коммутационная аппаратура, средства измерений и контроля параметров работы электрических сетей. На промышленных производствах – это средства защиты от перенапряжений, коротких замыканий, коммутационная аппаратура, элементы систем управления электроприводами.

Современное развитие микропроцессорной техники, разработка и внедрение программируемых систем, совершенствование элементной базы электроэнергетических систем и электротехнических комплексов выдвигают новые требования к уровню подготовки бакалавров, магистров и специалистов по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

1 КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1 Основные определения

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

Под электрическими аппаратами понимают широкий круг возможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

Потребителем электрической энергии (тепла) называется предприятие, организация, территориально обособленный цех, строительная площадка, квартира, у которых приемники электрической энергии (тепла) присоединены к электрической (тепловой) сети и используют электрическую энергию (тепло).

Электроустановками называют совокупность машин, аппаратов, линий электропередачи и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенные для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии.

Электропривод – электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение вспомогательных органов рабочей машины и управления этим движением (преобразовательное и (или) передаточное устройство могут отсутствовать).

Энергетической системой (энергосистемой) называется совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима и в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и теплоты при общем управлении этим режимом.

Электрической частью энергосистемы называется совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы.

Электроэнергетической системой называется электрическая часть энергосистемы и питающиеся от неё приемники электрической энергии, объединенный общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Электрической сетью называют совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их электрических линий, размещенных на территории района, населенного пункта, потребителя электрической энергии.

1.2 Классификация электрических аппаратов

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков:

а) по назначению (основной выполняемой функции):

Коммутационные аппараты распределительных устройств, служащие для включения и отключения электрических цепей. К этой группе относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, автоматические выключатели. Для этих аппаратов характерно относительно редкое их включение и отключение, но бывает и частое включение/отключение (выключение высокого напряжения в цепях питания электрических цепей);

Ограничивающие аппараты предназначены для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники, ограничители перенапряжения). Режимы короткого замыкания и перенапряжения являются аварийными, поэтому эти аппараты редко подвергаются наибольшим нагрузкам;

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

Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров – реле и датчики. Для реле характерно плавное изменение входной величины, вызывающее скачкообразное изменение выходной величины. В датчиках непрерывное изменение входной величины преобразуется в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Изменение выходной величины может происходить как плавно, так и скачкообразно. Датчики позволяют контролировать как электрические, так и не электрические величины;

Аппараты для измерений изолируют цепи первичной коммутации (главного тока) от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает стандартное значение. К ним относятся трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, делители напряжения;

Электрические регуляторы предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону.

б) по области применения

Аппараты распределительных устройств (высокого и низкого напряжения) – аппараты для электрических систем и электроснабжения;

Аппараты управления – аппараты, применяемые в схемах автоматического управления автоматического управления электроприводами и для автоматизации производственных процессов;

Однако одни и те же аппараты можно отнести к обеим группам, например рубильники, пакетные выключатели, контакторы, трансформаторы тока, реле и др.

в) по номинальному напряжению

Аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000В);

Аппараты высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000В).

В последнее время в схемах автоматики начинают широко использоваться *электронные аппараты* вместо существующих релейно-контактных электрических аппаратов. Бесконтактные электронные устройства способны осуществлять более сложные функции управления. Это значительно повышает надежность и быстродействие систем управления, уменьшает размеры и массу устройств, позволяет осуществлять многие дополнительные функции в системах управления. К таким устройствам можно отнести устройства памяти, арифметико-логические устройства, счетчики, счетно-импульсные реле времени, микропроцессоры и программируемые контроллеры.

1.3 Защитные оболочки электрических аппаратов

Для предотвращения соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими или подвижными частями и исключения попадания в аппараты инородных тел устанавливаются специальные защитные оболочки. Согласно ГОСТ 14254-80 защитные свойства оболочки обозначаются буквами IP и двумя цифрами (от IP00 до IP67). Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала, вторая – характеризует защиту от попадания внутрь аппарата инородных предметов и жидкостей.

1.4 Воздействие механических и климатических факторов на электрические аппараты

В условиях эксплуатации регламентируются действующими стандартами (ГОСТ 15150-69 и 15543-70). Под климатическими факторами внешней среды понимаются: температура и влажность окружающего аппарат воздуха, давления воздуха, солнечное излучение, дождь, ветер, пыль, солевой туман, иней, гидростатическое давление воды, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных элементов. Нормальные значения климатических факторов внешней среды, принятые для использования в технике, соответствуют данной географической зоне с учетом места размещения аппарата. В технической документации на аппарат всегда оговаривается значение климатических факторов, в пределах которых обеспечивается нормальная эксплуатация изделий. Эти значения принято называть номинальными. Значение климатических факторов, при которых обеспечивается сохранение номинальных параметров, и гарантированный срок службы аппаратов называются рабочими.

Маркировка аппаратов, согласно их климатическому исполнению приведена в табл. 1.

Таблица 1

Исполнение электрических аппаратов

Тип климата	Буквенное обозначение	Цифровое обозначение
Умеренный климат	У	0
Умеренный и холодный климат	УХЛ	1
Влажный тропический климат	ТВ	2
Сухой тропический климат	СВ	3
Сухой и влажный тропический климат	Т	4
Для всех макроклиматических районов кроме районов с очень холодным климатом	О	5

Значение климатических факторов:

а) при которых сохраняется работоспособность аппарата при допустимых отклонениях точности и номинальных параметров;

б) после прекращения действия которых, точность и номинальные параметры аппарата восстанавливаются принято называть рабочими.

В зависимости от места расположения в условиях эксплуатации электрические аппараты делятся на категории:

1 – на открытом воздухе;

2 – под навесом или в помещениях, где колебания t и влажности несущественно отличается от их колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха;

3 – в закрытых помещениях с естественной вентиляцией;

4 – в помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями;

5 – в помещениях с повышенной влажностью.

Климатическое исполнение и категория размещения указываются в конце сокращенного обозначения электрических аппаратов.

Например: ВЭ-10=1250-20-У3 – выключатель электромагнитный на $U_{\text{ном}} = 10\text{кВ}$, $I_{\text{ном}} = 1250\text{А}$, $I_{\text{ном.откл.}} = 20\text{кА}$, для умеренного климата и эксплуатации в закрытых помещениях.

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

2.1 Электрическая дуга

В 1802 г. знаменитый русский ученый Василий Владимирович Петров, производя обширные опыты по изучению электричества, открыл новое явление – электрическую дугу. В своей работе «Известие о гальвано-вольтовских опытах...» В.В. Петров об этом открытии рассказывал следующим образом: «Если на стеклянную плитку или на скамейку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светящихся явлений посредством гальвани-вольтовской жидкости, и если потом металлическими изоли-

рованными направителями, сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому от одной до трех линий, то между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медленнее загораются, от которого темный покой довольно ясно освещен может быть».

Большая группа электрических аппаратов представлена коммутационными устройствами, с помощью которых замыкается и размыкается электрическая цепь. Электрический разряд, возникающий при размыкании контактов, приводит к их износу и в значительной степени определяет надежность и долговечность аппарата. Этот разряд в окружающем газе является либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой. Появление электрических станций как самостоятельных предприятий и рост в связи с этим их мощности и напряжения очень скоро поставили молодую электротехнику перед фактом, что электрическая дуга – явление весьма устойчивое. Прекращение относительно большого тока в цепи путем разрыва проводящей связи всегда сопровождается появлением электрической дуги, устойчивость которой возрастает с увеличением мощности и напряжения электрической установки. Для установок с напряжением несколько сотен вольт прекращение дуги, а, следовательно, и тока осуществляется путем простого разрыва цепи. Однако когда напряжение относительно велико, такой способ практически непригоден, т.к. потребовалось бы разводить контакты на расстояние, измеряемое метрами.

Электрическая дуга – одна из форм электрического разряда в газе, т.е. такого состояния газов, при котором они, обычно являющиеся изоляторами, становятся проводниками.

При определенных условиях, созданных либо в результате воздействия на газ специальных агентов, либо в результате соответствующего сочетания таких факторов как напряжение, приложенное к газовому промежутку, форма электродов, расстояние между ними, температура и род газа, последний может сделаться проводящим. То есть в газе появляются свободные носители зарядов: электроны (–) и ионы (+).

Обычно газ состоит из большого числа электрически нейтральных молекул. Сделать газ токопроводящим возможно либо внеся в него извне элементарные электрические частицы (электроны, ионы), либо вызвав их появление в самом газе. Практически последнее достигается путем облучения газового промежутка или его электродов рентгеновскими лучами, лучами радия, ультрафиолетовым светом, нагревом газа, или существенным повышением напряжения.

Ионизация – процесс перехода газа из нетокопроводящего состояния в токопроводящее.

Деионизация – обратный процесс.

Под действием электрического поля заряженные частицы перемещаются, электроны – к положительно заряженному электроду (аноду), ионы – к отрицательно заряженному электроду (катоду).

Не все свободные заряды достигают электродов. Часть из них воссоединяется снова в нейтральные молекулы. Этот процесс называется *рекомбинацией*. Часть

свободных зарядов выносятся процессами диффузии из сферы действия электрического поля и не участвует в проведении тока.

Способы образования в газе свободных носителей зарядов:

- ионизация при соударении молекул с электронами;
- ионизация при соударении молекул с ионами (редко);
- ионизация световым излучением;
- термическая ионизация.

Некоторые виды разрядов предшествующие дуговому разряду:

а) *несамостоятельный разряд*, при котором под воздействием внешнего ионизатора возникают свободные заряды. При определенной напряженности все заряды будут достигать электродов. Ток при этом будет достигать своей максимальной величины и называется током насыщения.

б) *переход в самостоятельный разряд* – для возможности существования, которого важно, чтобы интенсивность ионизации была достаточно для восполнения всех потерь заряженных частиц. Чтобы любой элементарный процесс в одном направлении сопровождался подобным процессом в обратном направлении. В этом состоит принцип детально равновесия.

в) *тлеющий разряд* – первая ступень самостоятельного разряда. Плотность тока в нем существенно больше, чем при несамостоятельном разряде. Наблюдается свечение.

Тлеющий разряд имеет место при отключении тока менее 0,1А, при напряжении на контактах 250-300В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле, а в более мощных аппаратах является переходной фазой к разряду в виде электрической дуги.

г) *электрическая дуга* – разряд в газе или парах, обладающий низким катодным падением потенциала и большой плотностью тока.

Если ток и напряжение имеют значения выше указанных в таблице 2, то имеет место дуговой разряд, обладающий следующими особенностями:

1. Дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах.
2. Температура центральной части дуги очень велика и может достигать 6000-25000 °К.
3. При дуговом разряде плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает 10^2 - 10^3 А/мм².
4. Падение напряжения составляет всего 10-20В и практически не зависит от тока.

Таблица 2

Минимальные значения напряжения и тока необходимые для поддержания дугового разряда

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

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околокатодную, область столба дуги, околоанодную. В каждой из областей процессы ионизации и деионизации протекают по-разному.

Околокатодная область занимает весьма небольшое пространство, длиной не более 10^{-6} м. Около катода возникает положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между положительным объемным зарядом и катодом возникает электрическое поле с напряженностью до 10^7 В/м, в котором движутся электроны, создающие электрический ток. Напряжение U_i (разгоняющее), которое должен пройти электрон для приобретения энергии, необходимой для ионизации, называют потенциалом ионизации. Для газов этот потенциал колеблется от 13,3В (H_2) до 24,58В (He).

Положительные ионы также разгоняются электрическим полем, но из-за большей массы их скорость значительно ниже, чем у электронов, поэтому ионизация толчком происходит в основном за счет электронов.

В этой области имеет место ступенчатая ионизация. Ввиду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, необходимой для ионизации ударом. Чаще всего после удара атом переходит в возбужденное состояние (электрон атома переходит на более удаленную орбиту). При такой ионизации необходим многократный удар электронов по молекуле, поэтому ток около катода носит электронный характер.

В области *дугового столба* энергия, приобретенная заряженными частицами, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит.

При большой температуре, в области дугового столба, скорость частицы возрастает до значения, при котором удар в нейтральный атом приводит к его ионизации. Такая ионизация называется термической.

Степень ионизации

$$X \sim \frac{1}{\sqrt{P}},$$

где P – абсолютное давление газа, Па.

С ростом давления степень ионизации падает. Это свойство используется в дугогасительных устройствах электрических аппаратов.

В дуговом столбе наряду с процессом ионизации протекают процессы деионизации за счет рекомбинации и диффузии.

Обычно рекомбинация протекает так, что сначала электрон отрицательно заряжает нейтральную частицу, после чего происходит рекомбинация положительного и отрицательного ионов.

Уменьшение числа ионов за счет рекомбинации определяется из выражения

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{\text{рек}} = \alpha n^2,$$

где n – число ионов одного знака.

Деионизация в столбе идет также за счет диффузии. Вследствие теплового движения частиц происходит выравнивание плотности заряженных частиц, число

частиц в столбе уменьшается, сопротивление столба увеличивается. Скорость уменьшения числа частиц определяется из уравнения

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{\text{диф}} = \frac{2Dn}{r^2},$$

где λ – длина свободного пробега иона;

v – средняя скорость движения иона;

D – коэффициент диффузии

$$D = \frac{\lambda v}{3}.$$

Для стабильно горящей дуги, сопротивление которой неизменно при данном токе, $\frac{dn}{dt} = 0$, то есть скорость роста числа ионизированных частиц равна скорости их исчезновения.

При переходе к большему току $\frac{dn}{dt} > 0$.

При угасании дуги $\frac{dn}{dt} < 0$.

В околоанодной области поток электронов устремляется из столба дуги к положительному электроду (аноду). Анод при дуговом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается объемный отрицательный заряд, что и вызывает появление околоанодного падения напряжения и повышение напряженности электрического поля. Мощный поток электронов выбивает из анода электроны, которые также участвуют в создании отрицательного объемного заряда.

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падений напряжения у анода и катода. Такие дуги называют короткими. Условия гашения дуги в значительной степени определяются процессами, происходящими у электродов и условиями их охлаждения.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше околоэлектродных, и последними можно пренебречь. Условия существования таких дуг, называемых длинными, определяются процессами в столбе дуги.

2.1.1 Энергетический баланс дуги

Процесс ионизации и деионизации в значительной степени определяется температурой дугового промежутка, последняя зависит от количества тепла, выделяемого в дуге и отводимого от дуги.

Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

Для открытой дуги, горящей в воздухе, излучением отдается 15-30% выделяемой в дуге энергии.

Отвод тепла за счет теплопроводности газа зависит от его температуры. Так при температуре водорода 4000К, его молекулы диссоциируют на атомы. При этом от дуги отводится большее количество тепла. Теплопроводность газа сильно зависит от его состава, так, средняя теплопроводность водорода в 17 раз больше, чем воздуха.

2.1.2 Дуга постоянного тока

а) статическая вольт-амперная характеристики

Важнейшей характеристикой дуги является вольт-амперная характеристика (ВАХ), представляющая собой зависимость напряжения на дуге от тока. С ростом I увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги R_d .

ВАХ дуги, полученная при медленном изменении I , называется статической. Она зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов, параметров среды и условий охлаждения. Напряжение на дуге можно рассматривать как сумму околоэлектродных падений напряжений, U_o , и падения напряжения в столбе дуги.

$$U_d = U_o + E_n l,$$

где E_n – напряженность электрического поля в столбе дуги, В;

l – длина столба дуги, м.

Величина E_n зависит от тока и условий горения дуги. Статические ВАХ представлены на рис. 1. Чем больше длина дуги, тем выше лежит её ВАХ.

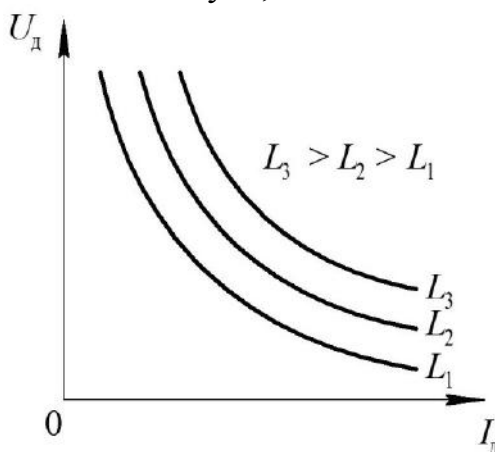


Рис. 1. Статические ВАХ при различной длине дуги

б) условия стабильного горения и гашения дуги

Рассмотрим баланс напряжений в цепи, изображенной на рис. 2.

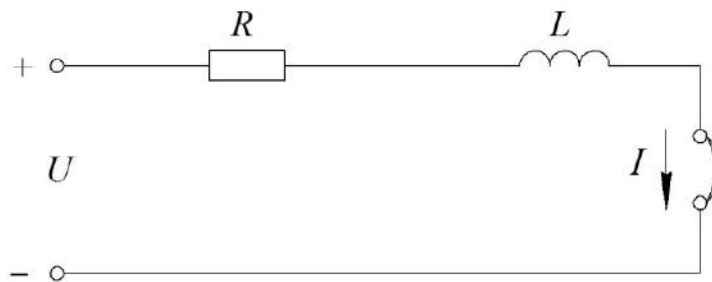


Рис. 2. RL -цепь при стабильном горении электрической дуги

Составим уравнения по закону Кирхгофа

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + U_{\text{д}}.$$

В стационарном режиме ток в цепи не меняется и, следовательно, $\frac{di}{dt} = 0$.

Совместно с ВАХ дуги (рис. 3) построена прямая $U - iR = f(i)$.

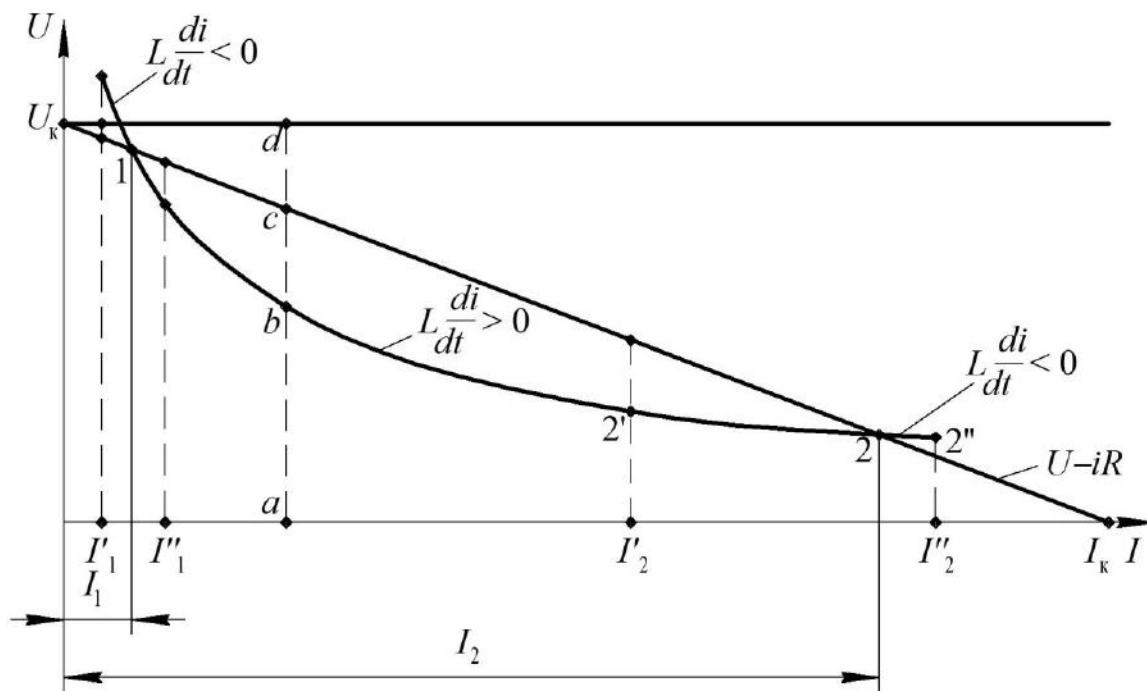


Рис. 3. Баланс напряжений в электрической цепи с дугой:
 ab – напряжение на дуге; bc – падение напряжения на индуктивности;
 cd – падение напряжения на активном сопротивлении

Рассмотрим процесс изменения тока в районе точки 1. Пусть $I'_1 < I_1$, в этом случае возникнет напряжение $L \frac{di}{dt} < 0$, и ток в цепи будет убывать до тех пор, пока дуга не погаснет. Если $I''_1 > I_1$, то возникнет напряжение $L \frac{di}{dt} > 0$. Ток будет возрастать до I_2 .

В районе точки 2, если напряжение снизится, по точка равновесного состояния перейдет в точку 2', при этом ток уменьшится до значения I'_2 , определяемого ВАХ с прямой $U' - iR$. Пусть напряжение источника увеличится до прежней величины U . Для тока I'_2 , отрезок $U' - iR > U_d$, поэтому в этой точке $L \frac{di}{dt} > 0$. Таким образом, при токе I'_2 на индуктивности возникает напряжение $L \frac{di}{dt} > 0$, которое увеличивает ток (производная положительна у растущей во времени величины). Процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение $L \frac{di}{dt} > 0$ не станет равным нулю.

Если по каким-либо причинам I''_2 тогда $L \frac{di}{dt} < 0$. Таким образом, точка 2 является точкой устойчивого равновесия.

В электрических аппаратах принимаются все меры для того, чтобы дуга гасла за минимально короткое время. Очевидно, для гашения дуги при всех значениях тока должно быть $L \frac{di}{dt} > 0$. Для выполнения этого условия необходимо чтобы $U_d > U - iR$.

Это достигается:

- поднятием ВАХ (увеличение длины дуги, охлаждением, повышением давления);
- увеличением активного сопротивления цепи.

При увеличении R ток в цепи будет уменьшаться $I_3, I_4, I_{кр}$ (рис. 4).

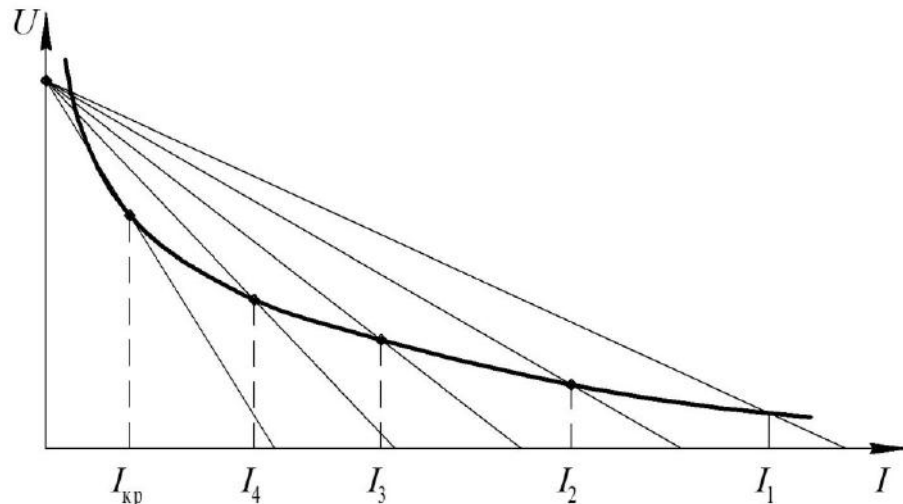


Рис. 4. Ток в цепи при различных сопротивлениях R и наличии дуги

В реальных условиях ток может изменяться достаточно быстро, ВАХ при таком изменении носит название динамической (рис. 5). При возрастании тока динамическая ВАХ (кривая B) идет выше статической, так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем ток. При уменьшении –

ниже, поскольку, в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении (кривая C).

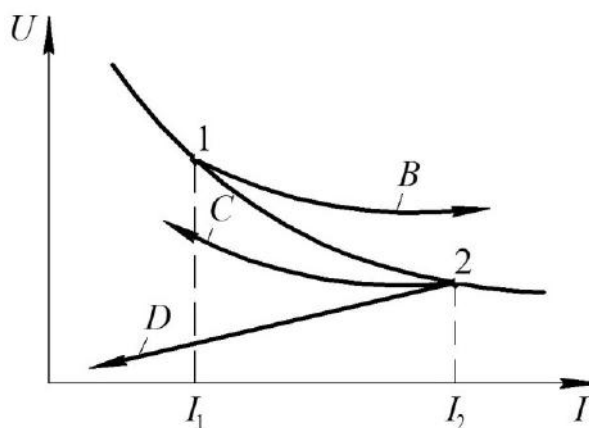


Рис. 5. Статическая и динамическая вольтамперные характеристики дуги

Динамическая ВАХ в значительной степени зависит от скорости изменения тока в дуге. Если в цепь ввести большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то во время спада тока до нуля сопротивление дуги остается постоянным. В этом случае ВАХ – прямая из точки 2 в точку $(0;0)$.

В реальном аппарате после размыкания контактов расстояние между ними меняется и дуга имеет переменную длину.

В точке 0 ток достигает максимального значения. При дальнейшем увеличении длины дуги наступают условия гашения дуги. Длина дуги, при которой статическая ВАХ касается прямой $U - iR$, называется критической. После точки 0 ток быстро уменьшается до 0 и дуга гаснет (рис. 6).

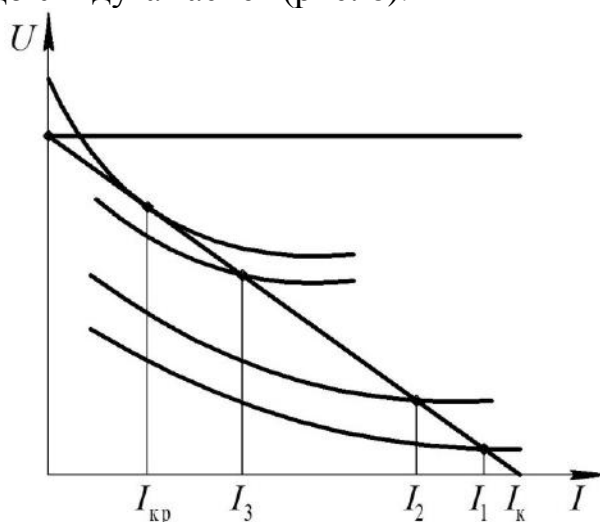


Рис. 6. Процесс отключения при переменной длине дуги

2.1.3 Дуга переменного тока

Дуга переменного тока возникает при коммутации силовых электрических цепей, так как большинство электроустановок высокого и низкого напряжения работает на переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

При частоте 50 Гц ток в дуге меняется быстро и происходящие процессы необходимо рассматривать с помощью динамической ВАХ. При синусоидальном токе напряжение на дуге (рис. 7) сначала поднимается до точки 1, затем в связи с ростом тока, падает до точки 2.

После прохождения тока через максимум динамическая ВАХ поднимается и проходит через точку 3. Зависимости изменения тока в дуге и напряжения на ней во времени представлены на рис. 7,б. При высокой частоте форма напряжения (кривая 2) приближается к форме тока. При подходе тока к нулю к дуге подводится малая мощность, температура падает, дуга гаснет. Напряжение, при котором дуга гаснет, называется напряжением или пиком гашения U_r .

В процессе гашения число заряженных частиц в области дугового промежутка уменьшается, и его сопротивление после гашения резко возрастает. При этом возрастает и *электрическая прочность промежутка*, то есть напряжение, при котором происходит его электрический пробой.

После того как электрическая дуга гаснет, к промежутку прикладывается *восстанавливающееся напряжение* U_v , создаваемое источником. Это напряжение является одним из решающих факторов при гашении дуги переменного тока как низкого, так и высокого напряжения. Для оценки кривой восстанавливающегося напряжения (рис. 8), вводится понятие *скорости нарастания* этого напряжения

$$v = \frac{dU}{dt_{cp}},$$

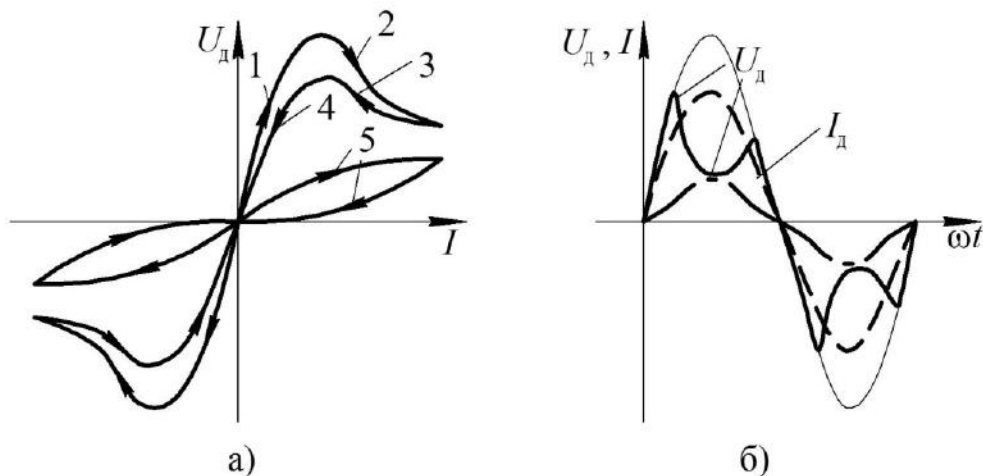


Рис. 7. Динамические характеристики дуги переменного тока

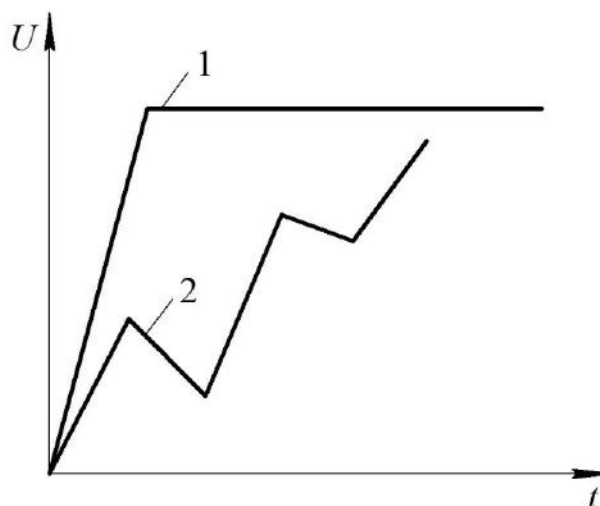


Рис. 8. Восстановление напряжения:

- 1 – допустимое значение восстанавливающегося напряжения;
2 – восстанавливающееся напряжение в месте установки выключателя

Восстанавливающееся напряжение часто оценивается собственной частотой F_0 и коэффициентом пика $K_a = \frac{U_m}{U_B}$, который определяется индуктивностью и емкостью цепи.

В высоковольтных выключателях этот коэффициент равен 1,4-1,5 и уменьшается с ростом отключаемого тока. В низковольтных он ниже.

2.2 Способы гашения дуги

Задача дугогасительного устройства состоит в том, чтобы обеспечить гашение дуги за малое время с допустимым уровнем перенапряжения, при малом износе частей аппарата, при минимальном объеме раскаленных газов, с минимальным звуковым и световым эффектом.

В электрических аппаратах низкого напряжения наиболее распространены дугогасительные устройства с узкой щелью, образованной дугостойкими стенками с высокой теплопроводностью. При этом столб дуги деформируется стенками дугогасительного устройства, а его сечение приобретает прямоугольную форму.

Для увеличения эффективности охлаждения ширина, δ , щели делается меньше диаметра дуги d_d . Кроме этого, по мере втягивания дуги в щель она приобретает форму зигзага. При этом увеличивается длина дуги и отвод тепла от нее. Перемещение дуги осуществляется магнитным полем.

Электрическая дуга, по сути, является проводником с током, который может взаимодействовать с магнитным полем. Сила взаимодействия между магнитным полем и током дуги перемещает дугу, создается так называемое *магнитное дутье*. Магнитное поле создается катушкой, включенной последовательно или параллельно с коммутируемой цепью.

Дугогасительные устройства с последовательной катушкой более распространены ввиду ряда преимуществ:

- при токах, больших 100А, магнитное поле быстро сдвигает дугу с рабочих поверхностей контактов, чем обеспечивает их малый износ;
- при изменении направления тока, меняет знак и магнитное поле, а сила, действующая на дугу, не изменяет своего направления;
- так как через катушку проходит номинальный ток контактора, то она выполняется из провода большого сечения, в результате чего падение напряжения составляет доли вольта.

К недостаткам можно отнести недостаточно надежное срабатывание при малых токах (5-7 А), затраты меди на катушку.

Дугогасительные устройства с параллельными катушками имеют следующие недостатки:

- направление ЭДС, действующей на дугу, зависит от полярности тока;
- при коротком замыкании возможно снижение напряжения на источнике, питающем катушку.

Вследствие этого дугогасительные устройства с параллельными катушками применяются только при отключении токов 5-10 А. На дугу возможно также воздействие магнитного поля постоянного магнита.

Дугогасительные устройства с последовательной катушкой применяются в высоковольтных выключателях на напряжение до 10 кВ. Дугогасительные устройства с параллельной катушкой не применяются в цепях переменного тока.

Существует несколько видов узкощелевых дугогасительных устройств с магнитным дутьем:

- лабиринтно-щелевые, в которых дуга гасится в результате её растягивания и охлаждения при соприкосновении с изоляционными пластинами различной конфигурации;
- с металлической (деионной) решеткой, в которой дуга расщепляется на несколько последовательных коротких дуг, вследствие чего облегчается процесс дугогашения;
- с гашением дуги в результате поперечного конвективного охлаждения её ствола при перемещении её с большой скоростью в газе.

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

После расхождения контактов возникшая дуга под действием магнитного поля движется на пластины и разбивается на ряд коротких дуг. На каждой пластине образуются катод и анод. Падение напряжения на каждой паре пластин составляет 20-25 В. При большом числе пластин удается поднять статическую вольт-амперную характеристику дуги и обеспечить условия гашения дуги.

Гашение дуги высоким давлением. Степень ионизации X уменьшается обратно пропорционально корню квадратному из давления. С ростом давления возрастает плотность газа, при этом увеличиваются теплопроводность и отвод тепла от дуги.

Если при данном токе в дуге увеличить давление окружающей среды, то увеличится отвод тепла. Для того чтобы сохранить тот же ток, необходимо к дуге подвести большую мощность, что при неизменном токе требует повышения напряжения. На этом принципе основывается гашение дуги в предохранителях и других аппаратах низкого напряжения.

Гашение дуги потоком сжатого газа. В электрических аппаратах высокого напряжения коммутируются токи в десятки килоампер при напряжении до 10^6 В. Для решения задачи гашения дуги используют воздействие на дугу потока сжатого воздуха или других газов. Сжатый воздух обладает высокой плотностью и теплопроводностью. Омывая дугу с большой скоростью, он охлаждает её и, при прохождении через нуль, обеспечивает деионизацию дугового столба. Воздух при высоком давлении обладает высокой электрической прочностью, что создает высокую скорость нарастания электрической прочности промежутка.

Одним из способов дальнейшего увеличения номинальных напряжений установок и токов короткого замыкания является применение новых дугогасящих газов. Наилучшие результаты получены с электротехническим газом – элегазом (SF_6). Он обладает следующими преимуществами:

- электрическая прочность элегаза в 2,5 раза выше, чем у воздуха, и при давлении 0,2 МПа близка к прочности трансформаторного масла;
- в дугогасительных устройствах продольного дутья дугогасящая способность элегаза примерно в 5 раз выше, чем у воздуха;
- высокая удельная плотность улучшает теплоотдачу токоведущих систем, что позволяет увеличить допустимую плотность тока и уменьшить массу меди в выключателях;
- элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом и водородом, слабо разлагается дугой, нетоксичен.

К недостаткам элегаза можно отнести высокую температуру сжижения. Так, например, при давлении 1,31 МПа переход из газообразного состояния в жидкое происходит при 0°C .

Гашение дуги в трансформаторном масле. Под действием энергии дуги происходит взрывоподобное разложение масла на водород и газы в виде паров масла. Водород обладает исключительно высокой теплопроводностью и является одной из лучших дугогасящих сред. Температура газа достигает 2000-3000 К. За сотые доли секунды давление поднимается до 2-4 МПа. Образующийся газовый пузырь стремиться вырваться из камеры через щель. При этом происходит эффективное охлаждение дуги потоками газа, вытекающими из камеры.

Гашение дуги в вакууме. В вакуумных ДУ электрический пробой затруднен вследствие отсутствия носителей зарядов. Пробивное напряжение промежутка 1 мм достигает 100 кВ. Электрическая дуга горит в среде паров металла электродов. Большим достоинством вакуумного ДУ является высокая скорость восстановления электрической прочности промежутка. Вакуумные ДУ являются в настоящее время наиболее долговечными и эффективным. Срок службы без ревизии составляет 25 лет. Созданы ДУ на токи до 2100 кА при напряжении 10 кВ, и на токи до

40 кА при напряжении 160 кВ. Вакуумные ДУ также могут применяться для отключения постоянного тока. Для этого используется схема на рис. 9.

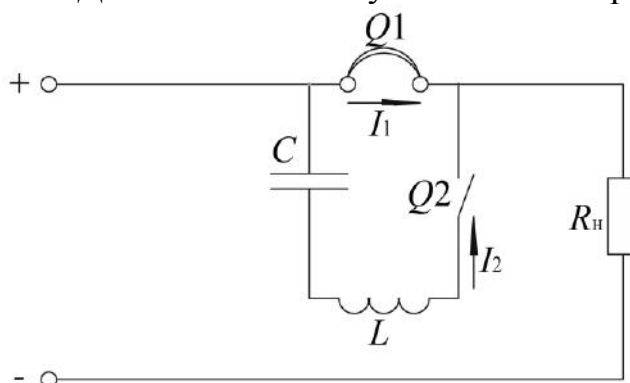


Рис. 9. Схема для отключения цепи постоянного тока

Гашение дуги с помощью полупроводниковых приборов. При большой частоте коммутаций возникает износ контактов при обычной дуговой коммутации. Для повышения износостойкости контактов применяют полупроводниковые приборы: диоды, транзисторы и тиристоры – так называемая бесконтактная коммутация.

При отключенном контакте $Q1$ (рис. 10) тиристор $VS1$ закрыт, и ток I_n равен 0. При включении $Q1$ положительный ток подается на управляющий электрод тиристора, и он открывается.

В схеме на рис. 11 главные контакты ГК шунтированы цепями дугогасительных контактов 1 и 2. После размыкания ГК ток цепи перебрасывается на цепь диода $VD1$ или $VD2$. При подходе тока к нулю сила электромагнита уменьшается, контакты размыкаются. Таким образом, дуга возникает вблизи нуля и горит кратковременно.

Бездуговая коммутация электрических цепей. На основе тиристоров могут быть созданы полупроводниковые выключатели, с помощью которых отключение цепи происходит до прохождения тока через нуль. Для этого применяются схемы с принудительной коммутацией. Наряду с тиристорами используются транзисторы. Бездуговая коммутация обеспечивается за счет отпираания или запираания транзисторов или тиристоров, которые исполняют роль коммутационных аппаратов.

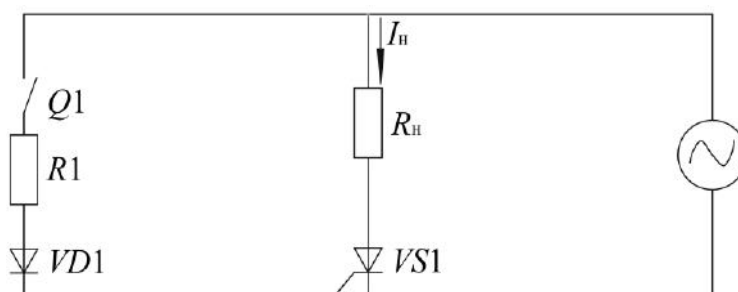


Рис. 10. Схема релейного элемента на тиристоре

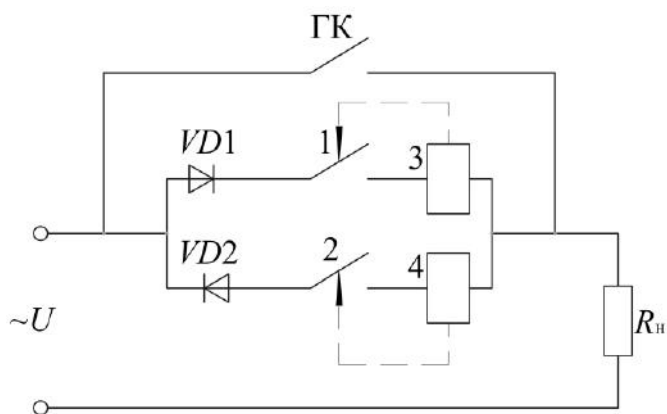


Рис. 11. Силовая цепь коммутационного устройства с диодами для гашения дуги

3 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

3.1 Электродинамическая стойкость электрических аппаратов

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

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

$$k_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2}I_{\text{ном}}},$$

где $k_{\text{дин}}$ – коэффициент кратности тока.

$i_{\text{дин}}$ – амплитудное значение тока;

$I_{\text{ном}}$ – действительное значение номинального тока;

$\sqrt{2}I_{\text{ном}}$ – амплитудное значение номинального тока.

Электродинамическая стойкость выражается либо через $k_{\text{дин}}$, либо через $i_{\text{дин}}$.

3.1.1 Методы расчета ЭДУ

Для расчета ЭДУ используется два метода:

а) согласно *первому методу*, ЭДУ определяется как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера (рис. 12).

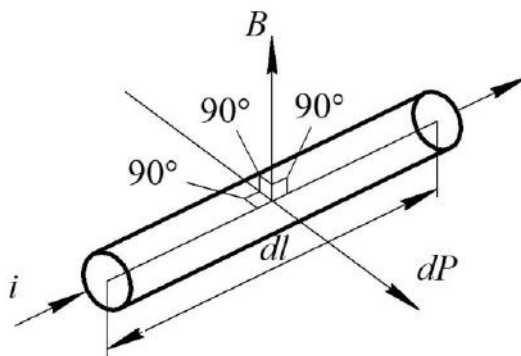


Рис. 12. Элементарный проводник с током

На элементарный проводник длиной dl с током I , в магнитном поле с индукцией B , созданной другим проводником, действует усилие:

$$dP = Bidl;$$

$$dP = Bidl \sin(\beta).$$

За направление dl принимается направление тока в элементе.

Направление индукции B , создаваемой другим проводником, определяется по правилу «буравчика», а направление усилия – по правилу левой руки.

Для определения полного усилия, действующего на проводник длиной L , необходимо просуммировать усилия, действующие на все элементы

$$P = \int_0^l dP = \int_0^l B \sin(\beta) dl.$$

Этот метод рекомендуется применять тогда, когда индукцию в любой точке проводника можно найти аналитически, используя закон Био-Савара-Лапласа, согласно которому, при отсутствии ферро-магнитных сред отрезок линейного провода dl , по которому течет ток i в направлении dl , в точке, удаленной на расстояние R от элемента тока (рис. 13), создает магнитную индукцию

$$\bar{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_l \frac{[d\bar{l} \times \bar{R}_0]}{R^2},$$

где R_0 – единичный вектор, проведенный от dl к точке, в которой определяется магнитная индукция.

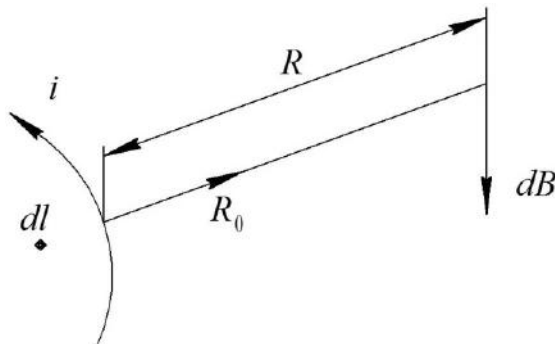


Рис. 13. Точка, в которой определяется магнитная индукция

б) *второй метод* основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током

$$P = \frac{\partial W}{\partial x},$$

где W – электромагнитная энергия;

x – возможное перемещение в направлении действия усилия.

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

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

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

где L_1, L_2 – индуктивности изолированных контуров;

i_1, i_2 – токи, протекающие в них;

M – взаимная индуктивность.

Усилие внутри одного независимого контура

$$P = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x}.$$

Усилие взаимодействия между двумя контурами

$$P = \frac{\partial W}{\partial x} = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x}.$$

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

При определении направления усилия учитывается индукция, создаваемая всеми остальными проводниками, за исключением того проводника, для которого она находится.

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

3.1.2 Усилия между параллельными проводниками

Усилие, оказываемое одним бесконечно тонким проводником конечной длины на другой такой же проводник.

$$P = 10^{-7} k i_1 i_2,$$

где k – коэффициент контура, зависящий от размеров проводников и от их расположения

$$k = \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right],$$

где $l = l_1 = l_2$ – длина проводников;

a – расстояние между проводниками.

Если расстояние между проводниками значительно меньше их длины, то есть $a \ll l$, то $k = 2l/a$.

При взаимодействии как угодно параллельно расположенных проводников разной длины, силы, действующие на них, одинаковы.

Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии вокруг проводников и в этом случае представляют собой окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Следует отметить, что поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на ЭДУ, а эффект близости, смещающий токи в проводниках, вызывает увеличение ЭДУ при встречных и уменьшает при согласных токах.

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

$$P = 10^{-7} k k_{\phi} i_1 i_2$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы, находится по кривым Двайта.

3.1.3 Усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники

В электрических аппаратах токоведущие части часто располагаются под прямым углом (рис. 14).

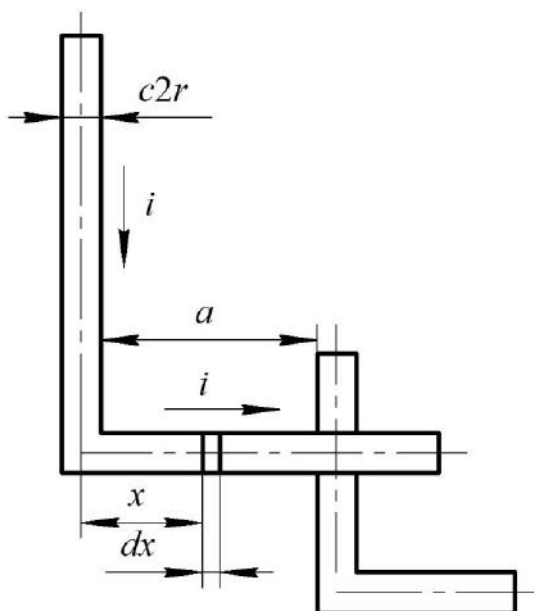


Рис. 14. Токоведущие части электрического аппарата

Усилие, действующее на элемент dx горизонтального проводника

$$dP_x = i B_x dx.$$

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

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{x}.$$

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

Усилие, действующее на участке от x до r

$$P_x = \int_r^x i B_x dx = \int_r^x i \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{x} dx = 10^{-7} i^2 \ln\left(\frac{x}{r}\right).$$

Тогда полное усилие P , действующее на перемычку на длине от r до a :

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

По мере удаления от оси вертикального проводника индукция и ЭДУ уменьшаются (рис. 15).

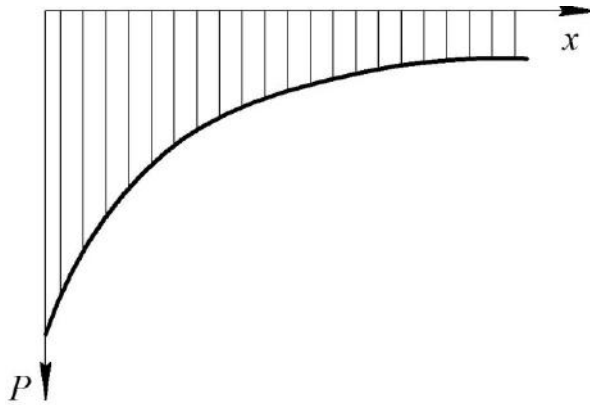


Рис. 15. Эпюра усилия, действующего на токоведущие части электрического аппарата

Довольно часто необходимо определить моменты ЭДУ относительно точки вращения или крепления контакта

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

3.1.4 Усилие в витке, катушке и между катушками

а) ЭДУ в витке

Усилие, действующее в витке (рис. 16), направлено по радиусу, поскольку с ростом радиуса возрастает индуктивность, а, следовательно, и электромагнитная энергия проводника, это усилие

$$P_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR}.$$

Усилие P_R приложено к окружности длиной $2\pi R$.

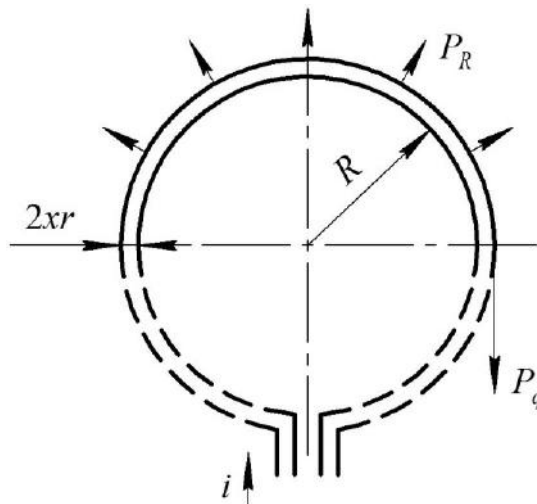


Рис. 16. Виток катушки

При расчете электродинамической стойкости необходимо знать усилие P_q действующее в сечении витка и стремящееся его разорвать

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

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

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

где r – радиус сечения окружности охватывающей w витков.

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

Электромагнитная энергия кольцевого контура

$$W = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \psi i = \frac{1}{2} w i \Phi,$$

где ψ – потокосцепление;

Φ – магнитный поток;

w – число витков в контуре.

ЭДУ действует по радиусу, растягивая контур, так как при этом индуктивность, потокосцепление и магнитный поток возрастают.

б) ЭДУ в катушке

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

$$P = \int_0^l B i dl.$$

в) ЭДУ между витками и между катушками

Если расстояние между витками соизмеримо с их диаметрами и последние мало отличаются друг от друга (рис. 17), то их взаимная индуктивность может быть выражена как

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

где $c = R_2 - R_1$.

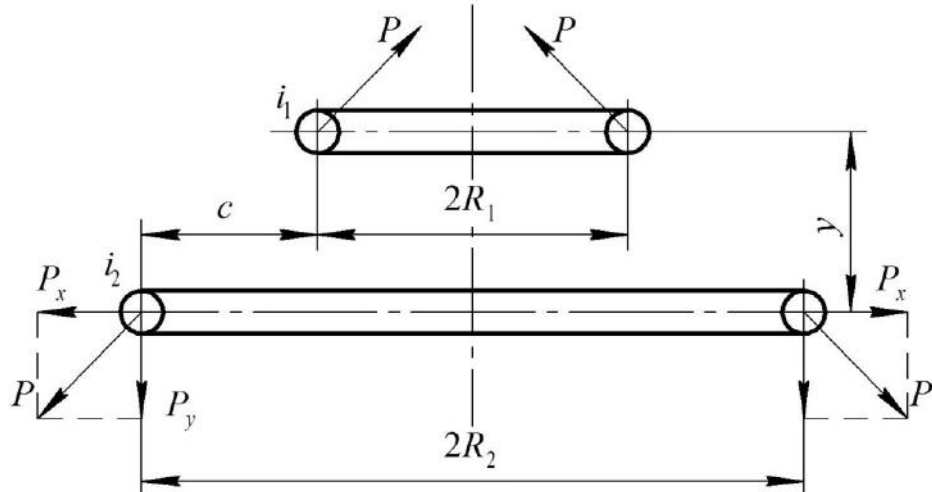


Рис. 17. Электродинамические усилия между катушками

Усилие, действующее на виток с током i_2 :

– вертикальная составляющая усилия

$$P_y = \frac{dW}{dy} = i_1 i_2 \frac{dM}{dy} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{R_1 y}{y^2 + c^2};$$

– горизонтальная составляющая тока

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

Для расчета усилий, действующих между двумя цилиндрическими катушками удобно пользоваться

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

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

$$M = \frac{\Psi}{i_1} = \frac{w_2 \Phi}{i_1},$$

где Φ – поток, пронизывающий вторую катушку;

i_1 – ток в первой катушке.

$$\Phi = \Lambda F_1,$$

где Λ – магнитная проводимость, определяющая поток Φ ;

F_1 – магнитодвижущая сила (МДС) первой катушки

$$F_1 = i_1 w_1.$$

Тогда

$$M = \frac{w_2 F_1 \Lambda}{i_1} = w_1 w_2 \Lambda.$$

Тогда усилие между двумя цилиндрическими катушками

$$P = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} = F_1 F_2 \frac{d\Lambda}{dx} = F_1 F_2 \psi,$$

где ψ – величина, зависящая от размеров катушек и их расположения (определяется с помощью кривых Двайта).

3.1.5 Электродинамические усилия при переменном токе.

Динамическая стойкость аппаратов

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

а) однофазная цепь

Пусть ток в проводнике изменяется по закону

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

где I_m – амплитудное значение тока;

ω – угловая частота.

При одинаковом направлении тока проводники притягиваются с усилием

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

где P_m – максимальное значение усилия, равное $10^{-7} k I_m^2$.

Усилие имеет постоянную составляющую $P_m/2$ и переменную составляющую двойной частоты $(P_m/2)\cos(2\omega t)$.

Среднее значение за период

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{P_m}{2} = 10^{-7} k \frac{I_m^2}{2} = 10^{-7} k I^2 = c I^2,$$

где $c = 10^{-7} k$;

I – действующее значение тока.

Таким образом, среднее значение ЭДУ пропорционально квадрату тока (действующего значения). Изменение усилия во времени при переменном токе в однофазной цепи происходит без изменения своего знака (рис. 18).

Иногда включение аппарата происходит при наличии КЗ в цепи нагрузки. Если включение происходит в момент времени, когда принужденная составляющая $i_{пр} = 0$, то апериодическая составляющая тока отсутствует и процесс выглядит также как и в предыдущем случае.

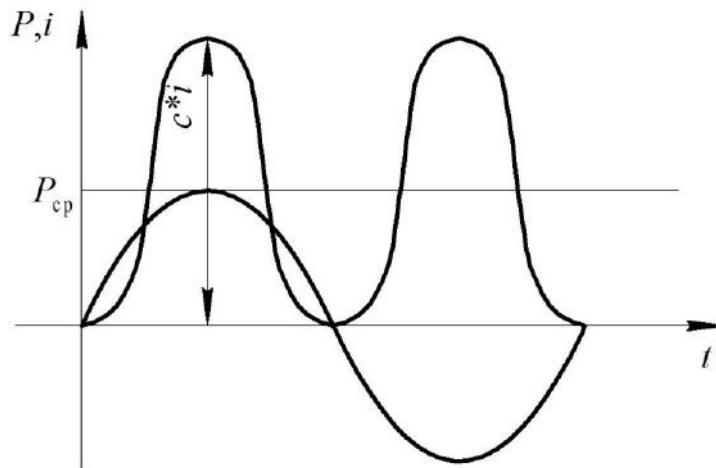


Рис. 18. Изменение усилия при переменном токе

Если включение происходит в любой другой момент времени, то возникает свободная апериодическая составляющая. Причина её возникновения – наличие в цепи индуктивности L .

Свободная составляющая спадает по закону

$$i_{\text{св}} = i_{\text{св0}} e^{\frac{-t}{T_a}},$$

где $T_a = L/R$ – постоянная времени апериодической составляющей тока.

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

$$i_{\text{уд}} = I_m \left(1 + e^{-\left(\frac{R/L}{\omega}\right)\pi} \right) = k_{\text{уд}} I_m.$$

Ударный коэффициент $k_{\text{уд}}$ зависит от постоянной времени T_a . Чем больше индуктивность цепи и меньше активное сопротивление, тем больше $k_{\text{уд}}$. В этом случае процесс выглядит в соответствии с рис. 19.

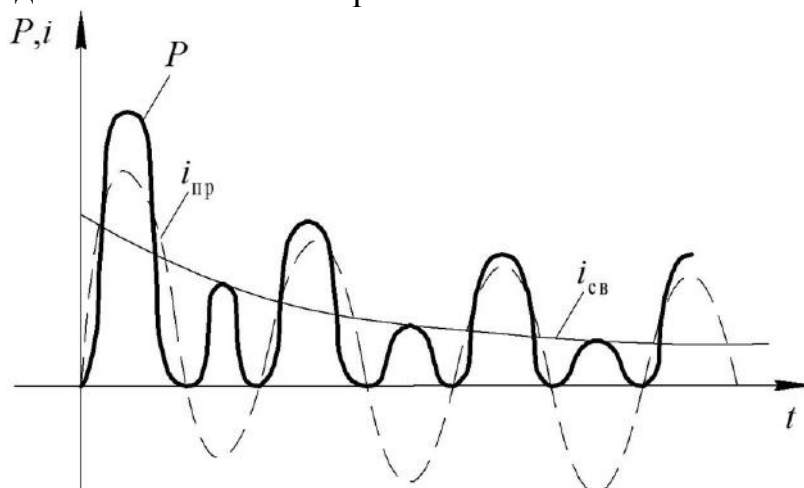


Рис. 19. Изменение усилия при переменном токе при включении аппарата на устойчивое короткое замыкание

б) *трехфазная цепь синусоидального тока*

Мгновенные значения токов в проводниках:

$$\begin{cases} i_1 = I_m \sin \omega t; \\ i_2 = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ i_3 = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3); \end{cases}$$

Усилие, действующее на проводник фазы 1

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

где P_{12}, P_{13} – ЭДУ между проводниками фаз 1 и 2, 1 и 3 соответственно.

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

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

$$c = 10^{-7} 2l/a;$$

l – длина проводника;

a – расстояние между проводниками.

Тогда

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

Таким образом, усилие P меняет знак и достигает в определенные моменты времени максимальных значений отталкивания и притягивания.

Действие на фазу 1:

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

$$P_{1\text{пр. max}} = 0,055cI_m^2,$$

Действие на фазу 2

$$P_{2\text{от. max}} = P_{2\text{пр. max}} = 0,87cI_m^2,$$

Действие на фазу 3:

$$P_{3\text{от. max}} = 0,805cI_m^2,$$

$$P_{3\text{пр. max}} = -0,055cI_m^2,$$

Таким образом, наибольшее усилие приходится на проводник средней фазы, именно этот случай следует принимать за расчетный.

При наличие апериодической составляющей (трехфазном КЗ)

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

в) *электродинамическая стойкость*

Механическая прочность элементов конструкции электрических аппаратов зависит от значения ЭДУ, его направления, длительности воздействия и крутизны нарастания. Расчеты прочности конструкций ведутся по максимальному значению ЭДУ, хотя действует оно кратковременно.

В однофазных установках ЭДУ определяется по ударному току КЗ.

Для трехфазного аппарата за расчетный ток берется

$$i_{уд} = k_{уд} I_{м3},$$

где $I_{м3}$ – амплитуда периодической составляющей тока трехфазного КЗ.

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

3.2 Термическая стойкость электрических аппаратов

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

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

При увеличении температуры от 100° до 250°С механическая прочность меди снижается на 40%. Эти процессы осложняются тем, что при КЗ, когда температура может достигать 200...300°С, на токоведущие детали воздействуют большие ЭДУ. Устойчивая работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

Нагрев электрических аппаратов токоведущих частей и изоляции в значительной степени определяет ее надежность.

Поэтому во всех возможных режимах работы электрических аппаратов температура не должна превосходить таких значений, при которых обеспечивается заданная длительность работы.

3.2.1 Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности

Различают три вида передачи тепла:

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

Количество тепла Φ , отводимого за 1 секунду от одного тела к другому за счет теплопроводности, прямо пропорционально перепаду температуры $\Delta\Theta$ между ними и обратно пропорционально термическому сопротивлению R_t того тела, через которое передаётся тепло

$$\Phi = \frac{\Delta\Theta}{R_T}.$$

б) *конвекция* – передача тепла путем перемещения частиц жидкости или газа. При естественной конвекции движение охлаждающего газа или жидкости происходит за счет разницы плотностей нагретых и холодных объемов газа или жидкости. При искусственной конвекции охлаждающая среда приводится в движение с помощью вентиляторов или насосов.

Количество тепла, отдаваемое за счет конвекции

$$\Phi_{\text{конв}} = \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)S,$$

где α – нелинейный коэффициент теплоотдачи при конвекции, определяемый теплом, которое снимается за 1 секунду с поверхности в 1 м^2 при разности температур охлаждаемой поверхности и охлаждающей среды 1°C , $\text{Вт}/(\text{м}^2^\circ\text{C})$;

Θ_2 – температура охлаждаемой поверхности, $^\circ\text{C}$;

Θ_1 – температура охлаждающей поверхности, $^\circ\text{C}$;

S – охлаждаемая поверхность, м^2 .

в) *тепловое излучение* – когда часть тепла нагретое тело отдает в окружающую среду путем излучения электромагнитных колебаний (ультрафиолетовых, световых и инфракрасных).

Тепло отдаваемое за счет излучения

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

где T_1 – температура поверхности, окружающей нагретое тело, $^\circ\text{K}$;

T_2 – температура нагретого тела, $^\circ\text{K}$;

$c_0 = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{K}^4$, излучательная способность абсолютно черного тела;

ε – коэффициент теплового излучения.

3.2.2 Режимы нагрева электрических аппаратов

а) установившийся режим нагрева

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

б) переходный процесс при нагреве и охлаждении

После включения аппарата температура его элементов не сразу достигает установившихся значений. Тепло, выделяющееся в аппарате, частично отдается в окружающее пространство, частично идет на повышение его температуры (рис. 20).

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

$$P = I_0^2 R_2.$$

Этот случай встречается при последовательном включении аппарата в цепь и малом изменении его сопротивления.

При втором режиме ток через аппарат не меняется, так как его сопротивление значительно меньше сопротивления нагрузки. Вследствие нагрева изменяется его сопротивление

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

При третьем режиме обмотка аппарата подключена к источнику бесконечной мощности

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

где Θ_0 – температура окружающей среды.

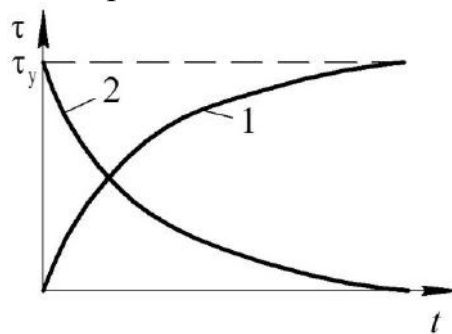


Рис. 20. Переходный процесс нагрева и охлаждения однородного тела

в) нагрев при кратковременном режиме работы

Кратковременный режим работы аппарата характеризуется тем, что при включении температура его не достигает установившейся. После кратковременного нагрева аппарат отключается, и его температура падает до значения температуры окружающей среды (рис. 21).

Для характеристики этого режима вводится понятие коэффициента перегрузки $k = I_{кр} / I_{дл}$, который показывает, во сколько раз может возрасти допустимая нагрузка по току по сравнению с длительным режимом.

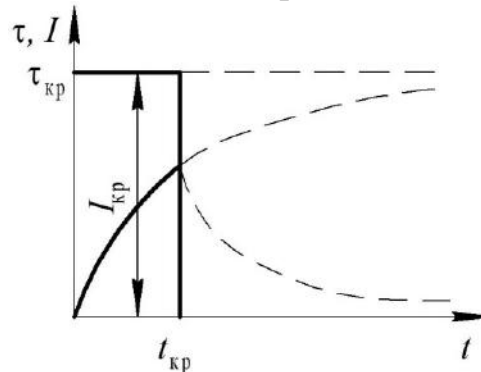


Рис. 21. Нагрев при кратковременном режиме

г) перемежающийся и повторно-кратковременный

При перемежающемся режиме (рис. 22), проходящий через аппарат ток циклически меняется, не спадая до нулевого значения. В течение времени работы t_{p1} через аппарат проходит неизменный ток I_{p1} . Установившееся превышение температуры при этом токе равно τ_{y1} . В течении t_{p2} через аппарат проходит ток I_{p2} . Этому току соответствует превышение температуры τ_{p2} .

Поскольку $I_{p1} > I_{p2}$, то в течение времени t_{p2} аппарат охлаждается.

Через некоторое время максимальные τ_{max} и минимальные τ_{min} превышения температуры соседних циклов станут одинаковыми. Наступит так называемый квазистационарный режим.

Частным случаем перемежающего режима является повторно-кратковременный режим, при котором $I_{p2} = 0$.

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения ПВ%.

$$ПВ\% = ПВ \cdot 100 = \frac{t_p}{t_n + t_p} 100 = \frac{t_p}{t_u} 100.$$

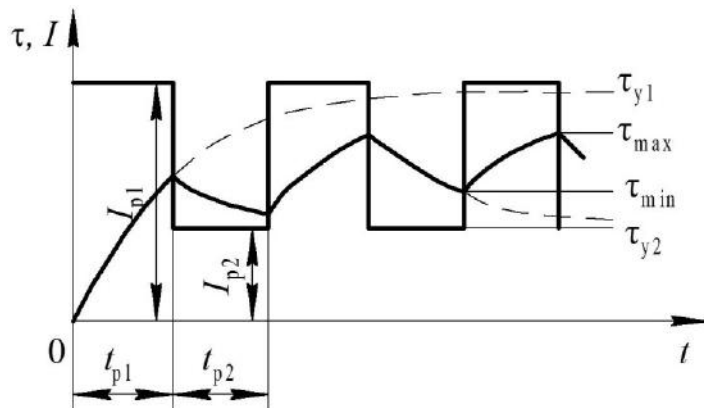


Рис. 22. Нагрев при повторно-кратковременном режиме работы

3.2.3 Нагрев аппаратов при коротком замыкании

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

$$I^2 R dt = c M dt,$$

где c – удельная теплоемкость проводника.

Температура проводников при КЗ может достигать больших значений (300°C). Поэтому необходимо учитывать изменение как сопротивления проводника R , так и удельной его теплоемкости c от температуры. Тогда

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

где $k_{\text{доб}}$ – коэффициент добавочных потерь в проводнике;

ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 0°C ;

q и l – сечение и длина проводника соответственно.

$$c = c_0 (1 + \beta \Theta),$$

c_0 – удельная теплоемкость проводника при 0°C ;

β – температурный коэффициент теплоемкости;

$$M = \gamma l q.$$

После подстановки получим

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

3.2.4 Термическая стойкость аппаратов

Предельные температуры элементов аппаратов определяются свойствами применяемых проводниковых, изоляционных, конструктивных материалов, временем температурных воздействий и назначением аппаратов.

В большинстве случаев аппараты рассчитываются для работы на высоте не более 100 м над уровнем моря. С ростом высоты падает плотность воздуха, в связи с чем ухудшаются условия охлаждения. На высоте 3000 м токовая нагрузка аппаратов снижается на 4, а при высоте 6000 м – на 10 процентов. Температура любого элемента аппарата складывается из температуры окружающей среды Θ_0 и превышения температуры данного элемента над температурой окружающей среды τ

$$\Theta = \Theta_0 + \tau.$$

Согласно ГОСТ 403-73 и 8024-84 наибольшая температура окружающей среды принята $+40^{\circ}\text{C}$.

При $\Theta_0 > +40^{\circ}\text{C}$ токовая нагрузка аппарата должна быть снижена таким образом, чтобы предельные температуры находились в соответствии с ГОСТ. Это достигается путем уменьшения значения превышения температуры τ . Допустимый ток при $\Theta_0 \neq +40^{\circ}\text{C}$

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{ном}} \sqrt{\frac{\Theta_{\text{доп}} - \Theta_0}{\Theta_{\text{доп}} - 40^{\circ}\text{C}}}.$$

При $\Theta_0 < +40^{\circ}\text{C}$ токовая нагрузка может быть увеличена по приведенной выше формуле.

Длительность и частота появлений КЗ достаточно малы. Поэтому допустимые температуры при КЗ в 2-4 раза выше, чем при длительном режиме. В соответствии с ГОСТ 687-78 предельные значения температуры при КЗ не должны превышать 200 °С для алюминиевых проводников, и 250 °С для проводников из меди и её сплавов, соприкасающихся с органической изоляцией или маслом, и 300 °С для проводников из меди и её сплавов, не соприкасающихся с органической изоляцией или маслом.

Способность аппарата выдерживать кратковременное тепловое действие тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе, называется *термической стойкостью аппарата*.

Токоведущие элементы аппарата, рассчитанные для длительного режима, должны быть проверены на термическую стойкость при КЗ.

4 Электрические контакты

4.1 Общие сведения

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

Как бы тщательно не были обработаны поверхности соприкосновения контактов, электрический ток проходит между ними только в отдельных точках, в которых эти поверхности касаются, так как получить абсолютно гладкую поверхность практически невозможно. Примерная картина соприкосновения контактов представлена на рис. 23.

Под действие нажатия P образуются площадки действительного касания. При одной площадке касания с радиусом a

$$\pi a^2 = \frac{P}{\sigma},$$

где P – сила контактного нажатия, Н;

σ – временное сопротивление на снятие материала контактов, Н/м.

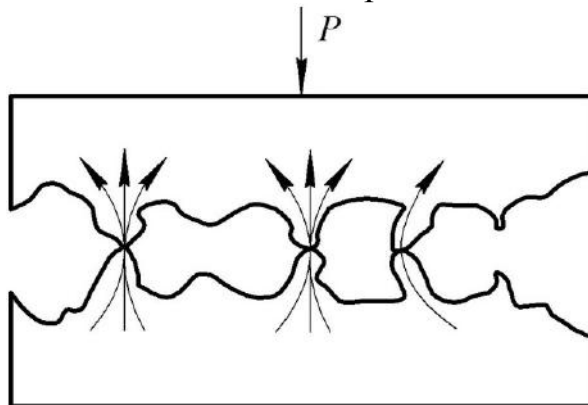


Рис. 23. Соприкосновение поверхностей контактов.

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

Сопротивление в области касания, обусловленное явлениями стягивания линий тока, называется *переходным сопротивлением контакта* $R_{ст}$.

Для идеализированной картины (одна переходная площадка)

$$R_{ст} = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{2a},$$

где ρ – удельное сопротивление.

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

$$R_{ст} = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{2\sqrt{P}} = \frac{k_1}{P^{\frac{1}{2}}}.$$

Одноточечный контакт применяется в основном при малых токах (до 20 А), при больших токах применяется многоточечный контакт. Его переходное сопротивление при неизменном нажатии меньше чем у одноточечного контакта. Но нажатие в каждой контактной площадке уменьшается.

Переходное сопротивление многоточечного контакта определяется по экспериментальной зависимости

$$R_{ст} = \frac{k}{P^m},$$

где $m = 0,7 \dots 1$;

k – постоянная, зависящая от конструкции контакта.

Из-за взаимодействия поверхности контактов с молекулами газов, поверхность контактов покрывается пленкой, тогда

$$R_{конт} = R_{ст} + R_{пл},$$

При $a \geq 10^{-3} R_{пл}$ можно пренебречь, при $a = 10^{-4}$ величина $R_{пл}$ может превышать $R_{ст}$ в 10 раз.

Для защиты контактов от воздействия окружающей среды, они могут быть помещены в герметичном баллоне с инертным газом. Такие контакты получили название герконов.

При прохождении тока через область стягивания его линий контакт нагревается. Приблизительно превышение температуры $\Delta \tau_{конт}$

$$\Delta \tau = \frac{U_{контакт}^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho},$$

где $U_{конт}$ – падение напряжение на переходном сопротивлении;

$$U_{конт} = IR_{ст};$$

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С);

ρ – удельное электрическое сопротивление материала контактов, Ом·м.

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

$$R(\theta) = R(0) \left[1 + \frac{2}{3} \alpha_R \Delta \tau_{\text{конт}} \right],$$

где $R(0)$ – сопротивление стягивания при температуре, равной температуре на границе области стягивания $\theta = \theta_0 + \tau_r + \Delta \tau$;

α_R – температурный коэффициент сопротивления материала контактов, $1/^\circ\text{C}$.

При увеличении тока через контакт увеличивается падение напряжения $U_{\text{конт}} = IR_{\text{ст.}}$, вследствие этого возрастает превышение температуры контактной площадки $\Delta \tau_{\text{конт}}$. Это, в свою очередь, вызывает увеличение сопротивления $R_{\text{конт}}$. Зависимость сопротивления $R_{\text{конт}}$ от напряжения $U_{\text{конт}}$, называемая $R(U)$ – характеристикой контакта, представлена на рис. 24.

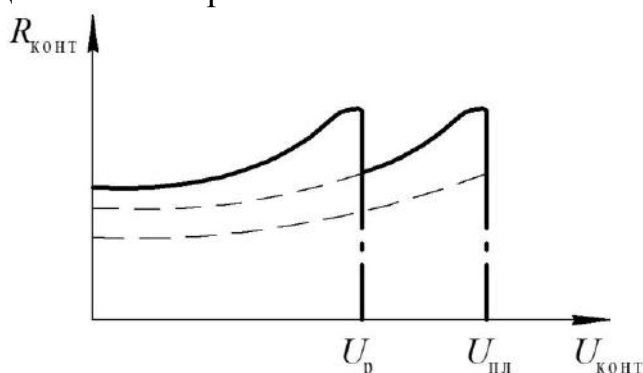


Рис. 24. $R(U)$ – характеристика контакта

При температуре размягчения контактная площадка касания увеличивается, а переходное сопротивление резко уменьшается при неизменном нажатии. Это состояние имеет место при $U_{\text{конт}} = U_p$, где U_p – напряжение рекристаллизации или размягчения материала. Если температура растет, то площадка касания может расплавиться, чему соответствует напряжение плавления $U_{\text{конт}} = U_{\text{пл}}$. Следовательно, температура контакта не должна достигать температуры плавления.

4.2 Режимы работы контактов

а) включение цепи

При включении электрических аппаратов в их контактных системах могут происходить следующие процессы:

- 1) вибрация контактов;
- 2) эрозия на поверхности контактов в результате образования электрического разряда между ними.

На рис. 25 подвижный контакт 1 связан с рычагом 2 и контактной пружиной 3, а неподвижный контакт 4 жестко закреплен на опоре. При включении контактора его электромагнит воздействует на рычаг 2, перемещение которого приводит к

прикосновению контактов 1 и 4. В момент соприкосновения контактов происходит удар, в результате которого происходит деформация смятия контактов и отброс контакта 1 вправо. Между контактами 1 и 4 образуется зазор, и, под воздействием приложенного к ним напряжения, загорается электрическая дуга.

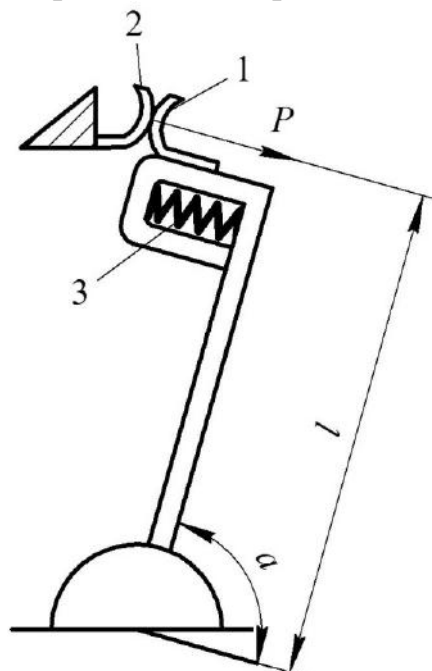


Рис. 25. Контактная система контактора в процессе включения

Движение контакта 1 вправо прекратится тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины. После этого контакт 1 под действием пружины 3 начнет перемещаться влево. Произойдет новый удар и новый отброс контакта.

Вибрация контактов усиливается с ростом их момента инерции. Из-за этого масса контактов должна быть минимальной. Для того, чтобы не было оплавления контактов в момент их соприкосновения, усилие предварительного натяга контактной пружины должно компенсировать электродинамические силы отброса, и создавать такое нажатие, при котором падение напряжения на переходном сопротивлении не приводит к плавлению площадки касания.

Напряжение на контакте в этом режиме $U_{\text{конт}} = I_{\text{конт}} R_{\text{конт}}$, этому напряжению соответствует перепад температуры на контактах $\Delta\tau = (I_{\text{конт}} R_{\text{конт}})^2 / (8\lambda\rho)$. Этот перепад должен быть меньше, чем температура плавления.

В аппаратах на большие токи КЗ усилия контактных пружин достигают нескольких тысяч ньютонов.

При определенном расстоянии между контактами происходит пробой между-контактного зазора. В аппаратах НН пробой наступает при очень малом расстоянии между контактами (сотые доли миллиметра). Электрическая дуга не возникает, так как подвижный контакт, продолжая двигаться, замыкает промежуток, прекращая тем самым разрядные процессы. Однако при пробое электроны бомбардируют контакт с положительным зарядом, анод и его материал переходит на катод,

откладываясь на нем в виде тонких игл. Износ контактов в результате переноса вещества с одного электрода 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. Возникающая дуга горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов, особенно при включении на существующее КЗ. За счет применения большого числа последовательно соединенных разрывов уменьшается напряжение, приходящееся на один разрыв, что дает возможность снизить время предварительного пробоя до 0,005 с, которое признано безопасным для масляных выключателей.

б) контакты во включенном состоянии

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

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при прохождении номинального тока, падение напряжения на переходном сопротивлении $R_{\text{конт}}$, было меньше падения напряжения в контакте для точки размягчения, $U_{\text{конт1}}$

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

Для однотоочечных контактов на малые токи используется формула

$$P_{\text{конт}} = I_{\text{ном}}^2 \frac{B\pi HV}{16\lambda^2 (\arccos \frac{T_0}{T_k})^2},$$

где $P_{\text{конт}}$ – контактное нажатие;

$I_{\text{ном}}$ – действующее значение номинального тока, А;

B – число Лоренца (для большинства металлов 2,33-2,49 В²/°С);

HV – твердость по Виккерсу, Н/м²;

λ – удельная теплопроводность, Вт/(м·°С);

T_k – температура точки касания, °К;

T_0 – температура тела контакта, °К.

Данная формула позволяет по заданному значению номинального тока и по известному соотношению T_0/T_k найти $P_{\text{конт}}$.

В аппаратах на большие токи применяются многоламельные (пальцевые) контакты. Ток через каждую ламельную цепь

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ном}} k_{\text{н}} / n;$$

где $k_{\text{н}}$ – коэффициент неравномерности, обычно равен 1,3;

n – число ламелей.

Вероятность приваривания контактов зависит от их конструкции и от всей токоведущей цепи аппарата. Электродинамические силы, действующие между токоведущими деталями, необходимо использовать для повышения электродинамической стойкости аппаратов. При кинематической схеме аппарата представленной на рис. 26а, контактная пружина должна создавать усилие

$$P = 2P_1 + P_2.$$

При кинематической схеме представленной на рис. 26б, электродинамическое усилие P_2 , действующее на перемычку, позволяет выбрать контактную пружину с меньшим усилием нажатия.

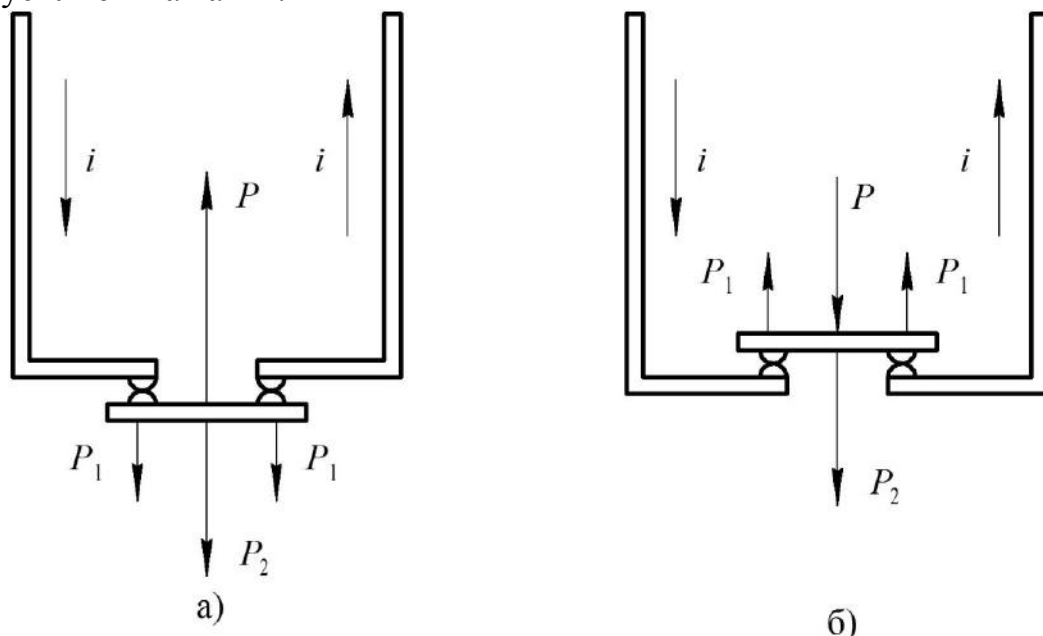


Рис. 26. Кинематические схемы, показывающие усилия, оказываемые на контакты

в) отключение цепи

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

При высокой температуре происходит интенсивное окисление и распыление металла контактов в окружающем пространстве, перенос металла с одного электрода на другой и образование пленки. Износ, связанный с окислением и образованием на электродах пленок химических соединений материала контактов со средой, называется химическим износом или коррозией.

Для существования дугового разряда необходимо, чтобы напряжение и ток превышали минимальные значения, U_0 и I_0 .

Если $I < I_0$, то при напряжении цепи 270-330 В возникает тлеющий разряд или искра. При $I < 5$ А срок службы контактов

$$N = \frac{0,6V_0\nu}{\nu_{\text{конт}}q_0},$$

где N – число допустимых отключений, которое может выдержать контакт;

V_0 – объем контакта, предназначенный на износ;

ν – плотность материала, кг/м³;

$\nu_{\text{конт}}$ – эмпирический коэффициент износа, кг/Кл;

q_0 – количество электричества, протекающего через межконтактный промежуток за одно отключение, Кл.

При ориентировочных расчетах

$$q_0 = \frac{1}{2} I_0 t_{\text{гашения}}.$$

Для борьбы с эрозией контактов на токи от 1 до 600 А предпринимаются следующие меры:

- сокращается длительность горения дуги с помощью дугогасительных устройств;
- устраняется вибрация контактов при включении;
- применяются дугостойкие материалы контактов.

4.3 Материалы контактов

Наиболее распространенные материалы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Распространенные материалы контактов

Материал контакта	Достоинства	Недостатки
Медь	Высокая удельная проводимость и теплопроводность	Низкая температура плавления, на воздухе покрывается слоем оксидов
Серебро	Высокие электрическая проводимость и теплопроводность, пленка имеет малую механическую прочность, малое переходное сопротивление	Малая дугостойкость и недостаточная твердость
Алюминий	Высокие электрическая проводимость и теплопроводность, малая масса	Образование на воздухе и в других средах пленок с высокой механической прочностью и сопротивлением; низкая дугостойкость; малая механическая стойкость, электрохимическая коррозия
Вольфрам	Высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии и сваривания	Высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность. Образование прочных оксидных и сульфидных пленок
Металлокерамические материалы	Сочетают в себе все необходимые свойства	—

К материалам контактов современных электрических аппаратов применяются следующие требования:

- 1) высокие электрическая проводимость и теплопроводимость;
- 2) высокая коррозионная стойкость в воздушной и других средах;
- 3) стойкость против образования пленок с высоким электрическим сопротивлением;
- 4) малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;
- 5) высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;
- 6) малая эрозия;
- 7) высокая температура плавления;
- 8) высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;
- 9) простота обработки, низкая стоимость.

4.4 Конструкция твердометаллических контактов

а) неподвижные разборные и неразборные контакты

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

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

Покрытие соприкасающихся поверхностей контактов оловом (лужение) несколько увеличивает начальное переходное сопротивление. Но благодаря пластичности олова увеличивается число площадок смятия и переходное сопротивление становится более стабильным. Для токоведущих деталей, от которых требуется повышенная надежность при больших токах, рекомендуется серебрение соприкасающихся поверхностей.

В болтовом шинном соединении при КЗ токоведущий проводник нагревается до температуры 200-300 °С. Во избежание пластической деформации шин устанавливаются соответствующие шайбы. В том случае, если болтовые соединения оказываются недостаточно надежными, применяются горячая или холодная сварка (особенно при алюминиевых контактах).

б) подвижные неразмыкающиеся контактные соединения.

Такие соединения используются либо для передачи тока с подвижного контакта на неподвижный, либо при небольшом перемещении неподвижного контакта под действием подвижного. Наиболее простым соединением такого типа является гибкая связь, изготавливаемая из медной ленты или многожильного жгута из мед-

ных жил. При больших ходах и больших номинальных токах применяются контактные соединения в виде скользящих токосъемов (рис. 27).

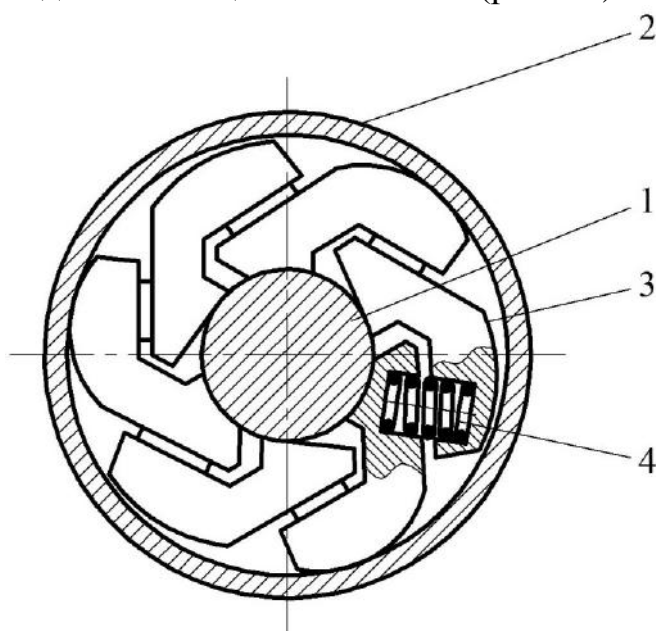


Рис. 27. Скользящий токосъем

Подвижный контакт 1 скользящего токосъема выполнен в виде круглого стержня. Цилиндрическая обойма 2 соединяется с неподвижным выводом аппарата. Соединение контакта 1 и обоймы 2 осуществляется пальцами (ламелями) 3. Контактное нажатие создается пружинами 4. Подвижный контакт 1 имеет возможность перемещаться поступательно. Неподвижный контакт имеет поверхность касания в виде цилиндрической плоскости, подвижный – в виде цилиндрической поверхности. Контактное взаимодействие осуществляется по линии, отчего контакт называется линейным.

Недостатком скользящего контакта является сила трения, которая требует значительной мощности приводного механизма. Сила трения уменьшается при использовании роликового контакта (рис. 28).

Подвижный контакт 1 роликового токосъема выполнен в виде стержня круглого сечения и имеет поступательное движение. Токосъемные стержни 2 также имеют круглое сечение и соединены с выводом аппарата. Соединение стержня 1 и стержней 2 осуществляется с помощью конусных роликов 3, которые катятся по поверхности стержней 1 и 2, контактное нажатие осуществляется пружинами 4.

Этот контакт для своего перемещения требует небольших усилий и широко распространен в современной аппаратуре ВН.

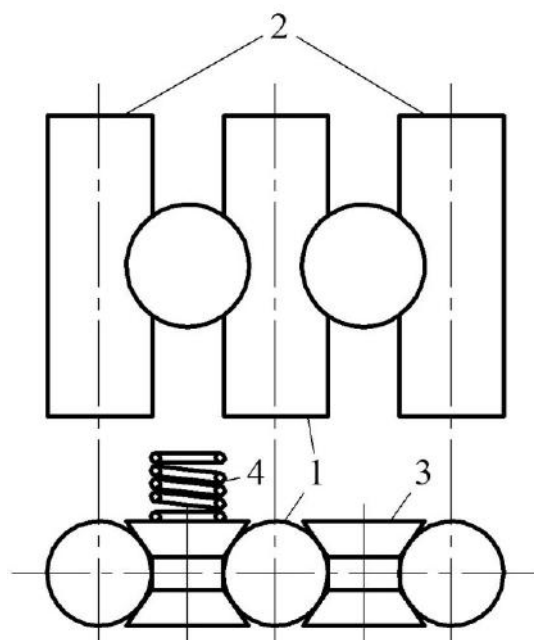


Рис. 28. Роликовый токосъём

в) разрывные контакты.

Контакты многих аппаратов разрывают связь с током, большим, чем минимальный ток дугообразования I_d . Возникающая электрическая дуга приводит к быстрому износу контактов. Для надежного гашения дуги, образующейся при отключении, необходимо определенное расстояние между неподвижным и подвижным контактами, которое выбирается с запасом. Расстояние между неподвижным и подвижным контактами в отключенном состоянии называется зазором контактов.

Существуют следующие виды контактов:

- 1) контактный узел с перекатыванием подвижного контакта;
- 2) неподвижный розеточный контакт;
- 3) щеточный контакт;
- 4) пальцевый самоустанавливающийся контакт.

Конструкция разрывных контактов определяется током, напряжением, током КЗ, режимом работы, назначением аппарата.

4.5 Жидкометаллические контакты

Основными недостатками твердометаллических контактов являются:

- 1) с ростом длительного номинального тока возрастают необходимое значение контактного нажатия, габариты и масса контактов, при токах 10 кА и выше резко увеличиваются масса и габариты;
- 2) эрозия контактов ограничивает износостойкость аппарата;
- 3) окисление поверхности, 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. 29).

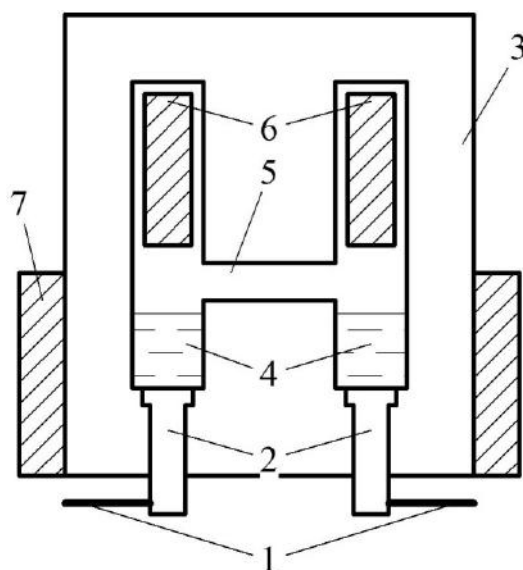


Рис. 29. Жидкометаллические контакты

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 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.

Преимущества ЖМК над твердометаллическими контактами:

1) малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела жидкий металл – электрод, что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие;

2) отсутствие вибрации, припаивания, залипания и окисления контактов при их коммутации;

3) возможность разработки коммутационных аппаратов на новом принципе;

4) возможность работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

Обычно к аппаратам предъявляются требования сохранять работоспособность при температуре ± 40 °С. Эти условиям соответствует только ртуть (в жидком состоянии при температуре ниже 0 °С), но токсичность ее паров существенно осложняет технологию ее применения.

Недостатками ЖМК являются:

1) обычно применяемые контактные материалы (галлий и его сплавы с другими металлами) требуют предварительного прогрева контактов до момента включения, так как температура окружающей среды может быть ниже температуры затвердевания этих материалов;

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

5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ АВТОМАТИКИ, УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

5.1 Электрические аппараты высокого напряжения (ВН)

5.1.1 Коммутационные и измерительные аппараты ВН. Силовые трансформаторы

Электрические аппараты ВН (АВН) используются в электроэнергетических системах (объединенных и автономных) для осуществления всех необходимых изменений схем выдачи мощности и электроснабжения потребителей в нормальном эксплуатационном режиме и в аварийных условиях, обеспечения непрерывного контроля за состоянием высоковольтных систем, ограничения возникающих в процессе эксплуатации перенапряжений и токов короткого замыкания, а также для компенсации избыточной зарядной мощности линий. Иными словами, с помощью высоковольтных электрических аппаратов осуществляется управление энергетическими системами в самом широком смысле этого понятия. По функциональному признаку АВН подразделяются на следующие виды:

- коммутационные аппараты (выключатели, выключатели нагрузки, разъединители, короткозамыкатели, отделители);
- измерительные аппараты (трансформаторы тока и напряжения (ТТ и ТН соответственно), делители напряжения);
- ограничивающие аппараты (предохранители, реакторы, разрядники, нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН));
- компенсирующие аппараты (управляемые и неуправляемые шунтирующие реакторы, компенсаторы реактивной мощности).

Коммутационные аппараты используются для формирования необходимых схем выдачи мощности от электростанций, её передачи на расстояние и схемам электроснабжения потребителей.

Выключатели ВН – предназначены для коммутации цепей ВН во всех режимах, возможных в эксплуатации: включение и отключение номинальных токов, токов КЗ, токов холостого хода силовых трансформаторов и емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий. Наиболее тяжелым режимом является отключение и включение токов КЗ.

Основными параметрами выключателей являются: номинальное напряжение, номинальный (длительный) ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток электродинамической стойкости, номинальная мощность отключения, номинальный ток отключения, номинальный ток включения, собственное

время отключения и включения выключателя, полное время отключения и включения выключателя.

Номинальный ток отключения, $I_{0.ном}$, представляет собой наибольший ток, который выключатель способен надежно отключать при возрастающем напряжении между фазами, равном наибольшему рабочему напряжению сети (при заданных условиях восстановления напряжения на контактах выключателя). Значение $I_{0.ном}$ характеризует отключающую способность выключателя. Часто отключающая способность выключателя характеризуется номинальной мощностью отключения

$$S_{отк.ном} = \sqrt{3} U_{ном} I_{ном} 10^{-6}.$$

Согласно ГОСТ 687-78 под номинальным током отключения понимается действующее значение периодической составляющей в момент расхождения контактов. Этот ток указывается на щитке выключателя.

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 $i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} I_{0.ном}$, либо действующим значением ударного тока за период после начала КЗ.

Собственное время отключения выключателя, t_c – время с момента подачи команды на отключения до начала расхождения контактов.

Полное время отключения выключателя t_0 – время от подачи команды на отключения до момента погасания дуги во всех полюсах.

Полное время включения выключателя – время от подачи команды на включение до завершения операции включения (посадка привода на защелку, окончание хода отделителя воздушного выключателя).

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 возобновить подачу энергии потребителю. Этот процесс называется автоматическим повторным включением выключателя (АПВ).

Время с момента отключения до нового включения должно быть достаточно малым для того, чтобы обеспечить непрерывную работу потребителя. Это время должно быть достаточным для деионизации пробитого промежутка после отключения цепи. Время деионизации составляет примерно 0,1-0,5 с и зависит от напряжения системы.

Если к моменту повторного включения КЗ в цепи не исчезает, тогда выключатель включается на существующее КЗ, после чего следует вновь отключение КЗ. В ряде выключателей, например, в масляных, отключение второго КЗ происходит в более тяжелых условиях, так как после первого отключения дугогасительное устройство может быть только частично заполнено маслом. Поэтому номинальное значение тока отключения зависит от цикла работы выключателя (без АПВ, с одно- или двукратным АПВ и т.д.).

Все выключатели могут быть классифицированы по методу гашения дуги, виду изоляции токоведущих частей между собой, на землю, принципам, заложенным в конструкцию дугогасительного устройства.

По методу гашения дуги выключатели бывают:

1) *масляные выключатели* – дуга между контактами горит в трансформаторном масле. Бывают:

- *баковые* (токоведущие части изолируются с помощью масла);
- *маломасляные* (токоведущие части изолируются с помощью твердых диэлектриков и масла);

2) *воздушные выключатели* – в качестве дугогасящей среды используется сжатый воздух, находящийся в баке под давлением 1-5 МПа;

3) *элегазовые выключатели* – гашение дуги происходит за счет её охлаждения с помощью элегазового дутья;

4) *электромагнитные выключатели* – охлаждение дуги за счет её удлинения;

5) *вакуумные выключатели* – дугогасящей средой является вакуум.

Баковые масляные выключатели. Баковый масляный выключатель представлен на рис. 30. В стальном баке 1 на маслonaполненных вводах 2 расположены дугогасительные устройства (камеры) 3. Маслonaполненный ввод (проходной изолятор) служит для проведения токоведущей цепи, находящейся под высоким напряжением, через металлическую стенку или другие преграды. Траверса 4 переключает выходные контакты камер. Горячие ионизированные выхлопные газы, выходящие из камер, могут вызвать перекрытие с камер на бак, что предотвращает баковая изоляция 5.

Перемещение траверсы 4 обеспечивается штангой 6, движущейся по направляющей 7 под действием пружин механизма и пружин камер.

На выключателе установлены магнитопроводы 8 с вторичными обмотками трансформаторов тока. Первичными обмотками трансформаторов являются токоведущие стержни вводов 2. Для сохранения вязкости трансформаторного масла при низких температурах предусмотрен электрический подогрев масла устройством 9.

При отключении контакты движутся вниз под действием пружины. В каждом разрыве образуется дуга. Под действием энергии дуги масло разлагается на водород, метан и другие газы.

В течение одной сотой секунды давление возрастает до 5-8 МПа. В момент прохождения тока через нуль дуга гаснет, и подвод мощности к ней прекращается. Однако энергия, выделенная дугой на протяжении предыдущего полупериода, создает в камере объем газа под высоким давлением, и соответствующий запас энергии. К моменту нуля тока это давление уменьшается, однако остается еще достаточно большим, чтобы создать газовый поток, охлаждающий дугу и восстанавливающий электрическую прочность дугового промежутка.

После того как тело подвижного контакта откроет дутьевую щель, создается поток газов и паров масла, охлаждающих и деионизирующих дугу. Следует отметить, что энергия, необходимая для гашения дуги, выделяется самой дугой.

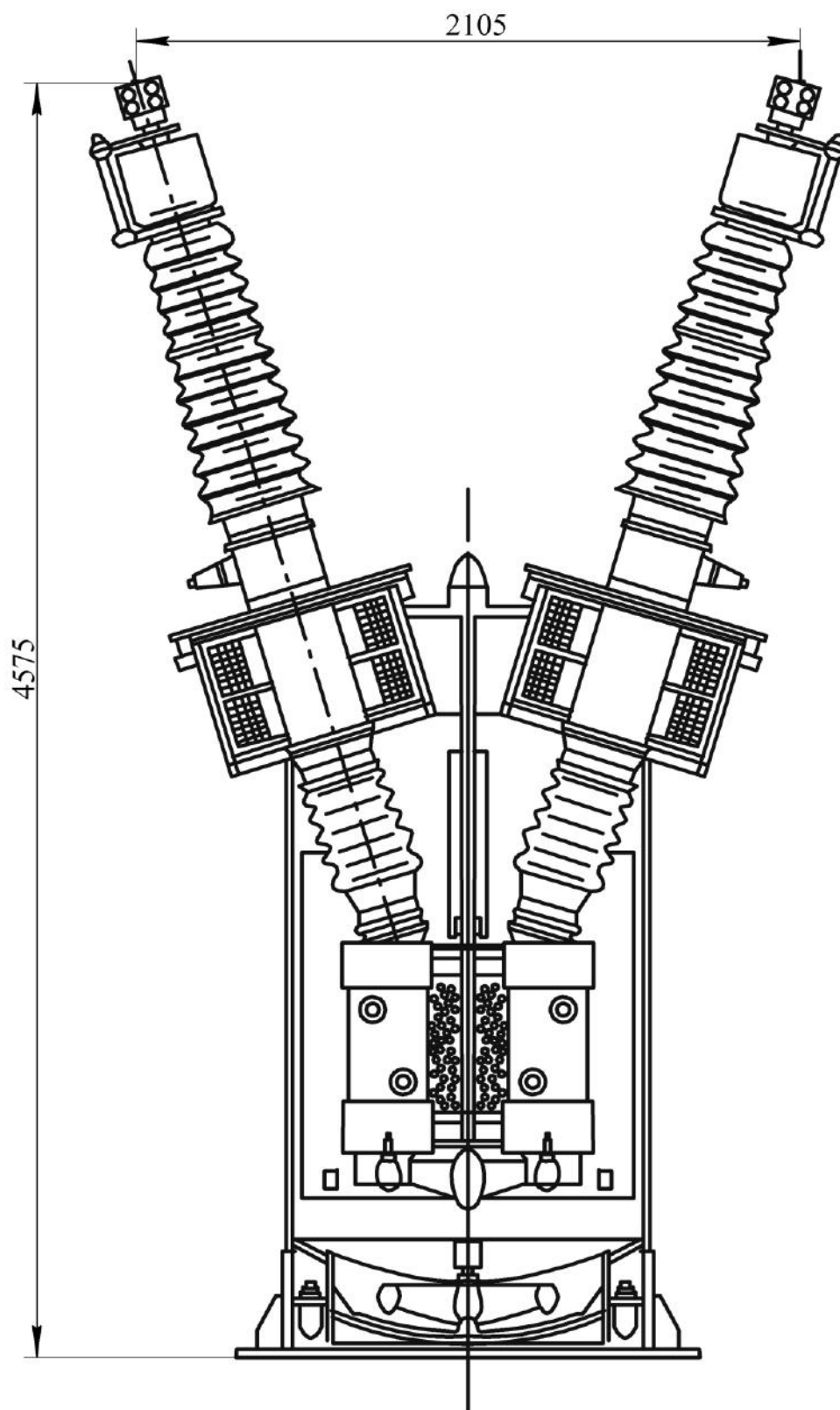


Рис. 30. Баковый масляный выключатель

Поэтому чем больше ток, тем больше давление в камере и интенсивнее гашение дуги. Обычно бак выключателя заполняется маслом на $\frac{2}{3}$ объема. При отключении газ, выбрасываемый из камеры, заставляет слои масла, лежащие над

камерами, двигаться с большой скоростью вверх. Воздух, находящийся над маслом, может свободно выходить в атмосферу. Таким образом, удастся ограничить давление в баке. После отключения масло, двигаясь по инерции, ударяет в крышку выключателя. Этот удар может быть столь сильным, что деформируются крепления бака к фундаменту. Поэтому фундамент должен быть рассчитан на эти нагрузки.

В случаях повреждения механизма или камер выключателя образуется длительно горящая «стоячая» дуга, при этом давление в баке может подняться до опасной величины. Взрыв бака является опасной аварией, так как выливающееся масло может воспламениться и вызвать пожар. Для предотвращения взрыва бака в его крышке расположены аварийные выхлопные трубы с калиброванными мембранами. При определенном давлении мембраны разрушаются, и из выключателя выливается масло, благодаря чему давление в баке снижается до безопасных пределов.

На протяжении многих лет конструкция масляных баковых выключателей улучшалась в направлении уменьшения массы и объема, увеличения отключающей способности.

Основными достоинствами этих выключателей являются: надежность, простота конструкции камер и механизма, высокая механическая прочность элементов (камер, механизма, вводов), возможность использовать встроенные ТТ и емкостные делители напряжения.

К недостаткам можно отнести: большие габариты и масса, необходимость периодической чистки масла, что требует наличия специализированного масляного хозяйства; сложность и трудоемкость ремонта и ревизии выключателей с напряжением 110 кВ и выше, взрыво- и пожароопасность.

Маломасляные выключатели. В маломасляных выключателях с целью уменьшения габаритных размеров, и массы изоляция, в основном, осуществляется твердыми материалами.

Контактная система (рис. 31), ДУ и устройство, превращающее вращательное движение рычагов в поступательное движение контактов, смонтированы в виде единого блока на полюсе 1. Этот блок с помощью опорных изоляторов 2 крепится к стальной раме 3. В верхней головке полюса 8 расположены подвижный контакт и механизм, в нижней 9 – неподвижный контакт.

В раме установлены вал выключателя 5, отключающая пружина, пружинный буфер включения и масляный буфер отключения 6. Вал 5 связан с выходным рычагом механизма полюса 7 с помощью прочной изоляционной тяги 4. При включении изоляционная тяга 4 поворачивает выходной рычаг полюса 7 против часовой стрелки и производит замыкание контактов. Отключающая пружина при этом растягивается, а пружинный буфер включения сжимается. Этот буфер развивает большую силу на небольшом ходе, соответствующем ходу подвижного контакта в розетке, и создает необходимую для гашения дуги скорость перемещения подвижного контакта.

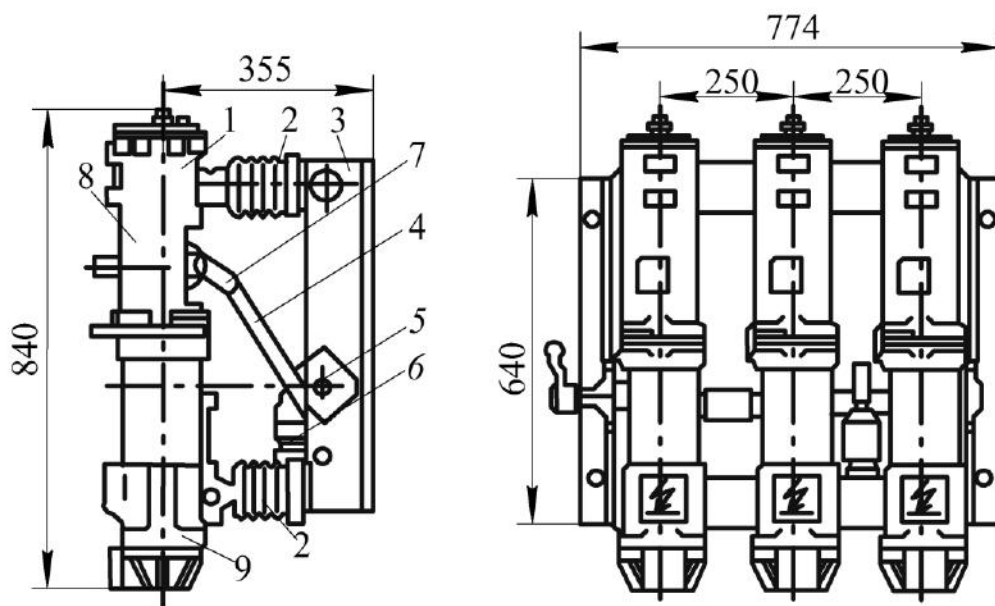


Рис. 31. Маломасляный выключатель

Для уменьшения обгорания концы ламелей розеточного контакта облицованы металлокерамикой. Под действием дуги, возникающей при расхождении контактов, масло разлагается и образующиеся газы создают в камере давление. В тот момент, когда тело подвижного контакта 6 (свеча) откроет первую щель, возникнет газовое дутье, и при прохождении тока через нуль возможно гашение дуги. Обдув газами еще более усиливается после открытия свечей второго и третьего каналов. Обычно гашение дуги с большим током происходит после открытия первых двух щелей. При отключении малых токов в камере ДУ давление невелико, и дуга не гаснет после открытия всех трех щелей. Дуга затягивается в масляные карманы 5, под действием дуги масло в кармане разлагается, и газы стремятся выйти вниз, охлаждая дуговой промежуток. Процесс усиливается по мере включения новых карманов.

Газы, образующиеся в процессе гашения дуги, выходят через зигзагообразный канал в верхней головке полюса. Во избежание выброса масла из полюса в его верхней части установлен специальный маслоотделитель.

По сравнению с баковыми, маломасляные выключатели имеют ряд преимуществ:

- 1) меньшие масса и габаритные размеры при малом объеме масла;
- 2) ДУ всегда готово к работе;
- 3) осмотр и ремонт дугогасительных камер и контактов возможен без слива масла, что обеспечивает удобство эксплуатации.

К недостаткам маломасляных выключателей можно отнести:

- 1) менее надежны в работе, чем баковые, изоляционные детали – рубашки, опорная изоляция – подвергаются повышенным механическим нагрузкам, номинальный ток отключения маломасляных выключателей ниже, чем у баковых;
- 2) маломасляные выключатели, как правило, не допускают встроенных ТТ.

3) маломасляные выключатели широко распространены на напряжение 6-10 кВ.

Приводы масляных выключателей:

а) ручной привод

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. При таком приводе не возможно дистанционное включение выключателей, поэтому широкая автоматизация подстанций ограничивает их применение.

б) электромагнитный привод

Электромагнитный привод предназначен для выключателей с максимальным статическим моментом на валу не более 400 Н·м. Включение производится броневым электромагнитом постоянного тока с якорем и катушкой. Электромагнитные приводы характеризуются простотой конструкции, высокой надежностью, согласованностью характеристик привода и противодействующих сил выключателя. Недостатками этих приводов являются большое время включения (для мощных выключателей – до 1 с), большое потребление энергии, необходимость мощных аккумуляторных батарей для питания электромагнитов, питающие кабели должны иметь большое сечение. Вследствие этого электромагнитные приводы рекомендуется применять для выключателей небольшой мощности.

в) пружинный привод

В пружинном приводе энергия, необходимая для включения, запасается в пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя. Пружинные приводы позволяют осуществить АПВ. После включения выключателя автоматически производится взведение включающих пружин, и привод подготавливается к повторному включению. Пружинный привод не требует аккумуляторной батареи и связанных с ней затрат, что является его преимуществом по сравнению с электромагнитным приводом. По сравнению с пневматическим и гидропневматическим приводами пружинный привод более прост по конструкции.

г) пневматический привод

При открытии клапана сжатый воздух воздействует на поршень. Шток поршня приводит к включению выключателя. Пневмопривод широко распространен для маломасляных выключателей. Бак со сжатым воздухом и привод встраиваются в конструкцию выключателя. Сжатый воздух подводится от централизованной компрессорной установки. Такой привод имеет ряд преимуществ перед электромагнитным: высокое быстродействие (время включения 0,25 с для мощных выключателей), отсутствие аккумуляторных батарей.

д) пневмогидравлический привод

В пневмогидравлическом приводе аккумуляция энергии, необходимой для включения, осуществляется за счет сжатия газа под большим давлением. Для исключения утечки и растворения газ заключен в эластичный резиновый баллон, размещенный в стальном сосуде. При работе насоса масло нагнетается в сосуд и резиновый баллон сжимается. Нормальная работа возможна, если вязкость жид-

кости не меняется с температурой. Пневмогидравлический привод обладает высокими быстродействием и надежностью, удобством в эксплуатации. По характеристикам превосходит пневматический привод.

Воздушные выключатели. Сжатый воздух используется в воздушных выключателях для гашения дуги путем направления его струей вдоль или поперек дуги, а также для включения и отключения системы разъемных контактов. Сжатый воздух подается к выключателю от компрессорной установки распределительного устройства по системе воздухопроводов. Выключатели снабжаются баллонами, содержащими запас сжатого воздуха для быстрого его поступления в дугогасительные камеры при размыкании контактов. Включение и отключение выключателей осуществляется открыванием электромагнитных клапанов, через которые сжатый воздух подается из баллонов выключателя в соответствующие устройства.

По конструктивному устройству воздушные выключатели подразделяются на:

- выключатели с отделителями;
- выключатели без отделителей.

Выключатели с отделителями снабжаются дугогасящими контактами, расходящимися только в момент подачи сжатого воздуха в дугогасительные камеры на время, нужное для гашения дуги, после чего они снова замыкаются. В промежуток времени после погасания дуги и до замыкания дугогасящих контактов срабатывает отделитель, образуя необходимый изоляционный промежуток в электрической цепи на время, в течении которого выключатель находится в отключенном состоянии. Включение выключателя и замыкание электрической цепи производит отделитель.

В выключателях без отделителя контакты, разрывающие электрическую цепь при отключении, остаются разомкнутыми на все время отключенного положения выключателя.

Элегазовые выключатели. Одним из быстро развивающихся направлений создания новых конструкций выключателей высокого и сверх высокого напряжения, отличающихся меньшими габаритами и отвечающих требованиям современной энергетики по коммутационной способности и надежности, является применение дугогасящих сред, более эффективных по сравнению с воздухом и маслом. Использование электротехнического газа (SF_6 – элегаза) для этих целей обусловлено удачным сочетанием в нем изоляционных и дугогасящих сред.

По сравнению с воздухом этот газ обладает следующими преимуществами:

1) электрическая прочность выше в 2,5 раза, чем у воздуха, при давлении 0,2 МПа электрическая прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла;

2) высокая удельная теплоемкость (почти в 4 раза выше, чем у воздуха) позволяет увеличить нагрузку токоведущих частей и уменьшить массу меди в выключателе;

3) номинальный ток отключения камеры продольного дутья с элегазом в 5 раз выше, чем с воздухом;

4) малая напряженность электрического поля в столбе дуги, благодаря этому резко сокращается износ контактов, уменьшается эффект термодинамической закупорки сопла;

5) элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом и водородом, слабо разлагается дугой, нетоксичен, хотя некоторые продукты разложения опасны.

Недостатком является высокая температура сжижения. Например, при давлении 1,31 МПа переход элегаза в жидкое состояние происходит при 0 °С.

По способу гашения дуги в элегазе различают следующие виды элегазовых выключателей:

- автокомпрессионные с дутьем в элегазе, создаваемым посредством компрессионного устройства (выключатели с одной ступенью давления);
- с гашением дуги в ДУ, обеспечивается вращением дуги по кольцевым контактам под действием поперечного магнитного поля, создаваемого отключаемым током (выключатели с электромагнитным дутьем);
- с ДУ продольного дутья, в которое предварительно сжатый газ поступает из резервуара с относительно высоким давлением элегаза (выключатели с двумя ступенями давления);
- с ДУ продольного дутья, в котором повышение давления элегаза происходит за счет разогрева газовой среды дугой отключения в специальной камере (выключатели с автогенерирующим дутьем).

У элегазовых колонковых выключателей дугогасительная камера расположена в изоляторе, который может быть изготовлен из фарфора или из комбинированного материала, и находится под высоким напряжением, уровень которого определяет длина изолятора, требуемая для камеры. Для изоляционной конструкции высокого уровня напряжения несколько дугогасительных камер соединяются последовательно в элегазовом колонковом выключателе и монтируются на опорной изоляционной конструкции.

Трансформаторы тока устанавливаются отдельно, за элегазовым колонковым выключателем. Следующим отличительным свойством элегазовых колонковых выключателей является наличие сравнительно маленькой газовой камеры. Преимущество малого объема газа приводит к сокращению объема работ по техническому обслуживанию.

Достоинства элегазовых выключателей:

- пожаро- и взрывобезопасность;
- быстрота действия;
- высокая отключающая способность;
- малый износ дугогасительных контактов;
- возможность создания серий с унифицированными узлами;
- экономичность;
- пригодность для наружной и внутренней установки.

Основанная на принципе автокомпрессии дугогасительная система оптимально использует энергию электрической дуги для ее гашения, до минимума снижая

тем самым использование энергии привода. Самосмазывающиеся приводные механизмы и испытанные на практике контактные системы обеспечивают бесперебойную работу на длительный срок службы даже при высокой частоте переключений. Но это только одно объяснение экономичной работы силовых выключателей. Второе – работая даже в экстремальных климатических условиях, силовые выключатели могут находиться в эксплуатации много лет. Так, например, покрытие элегазового выключателя типа ВГТ-110П-40/2500У1 выдерживает очень жесткое испытание, при котором происходит распыление солевого раствора. Высокое качество исключает необходимость проведения ремонта измерительных приборов в результате влияния окружающей среды и погодных условий с самого начала работы выключателей. Очень экономична перевозка на объекты заказчика силовых выключателей. Они перевозятся в полностью собранном и испытанном состоянии или в виде собранных, испытанных на заводе и готовых к перевозке блоков, что снижает транспортные расходы и обеспечивает надежность эксплуатации. Это относится и к монтажным работам и расходам на них, которые составляют минимум затрат благодаря малому числу блоков. Монтажно-ремонтное подразделение завода-изготовителя под техническим руководством заказчика способно провести установку этих выключателей на любом объекте.

Оптимальная безопасность. Все выключатели типа ВГТ-110П-40/2500У1 удовлетворяют строжайшим нормам безопасности, т.к. завод-изготовитель уделяет большое внимание безопасности персонала во время работы и защите окружающей среды. Для этого все компоненты выключателей подвергаются многократным испытаниям.

Максимальная надежность. Еще одним преимуществом силовых элегазовых выключателей является их надежность в работе на протяжении всего срока службы. Это объясняется тем, что для изготовления применяются оправдавшие себя на практике высококачественные материалы, детали и системы. Главные компоненты силовых выключателей, такие как привод и дугогасительные камеры – это узлы, которые применяются как для элегазовых колонковых, так и для элегазовых баковых высоковольтных выключателей. Пружинный привод расположен в компактном алюминиевом корпусе. Как включающая, так и отключающая пружины расположены в блоке привода. Блок привода полностью отделен от газовых камер. В целом, выключатели представляют собой простую, массивную конструкцию, имеющую лишь несколько движущихся частей, что позволяет гарантировать высокую эксплуатационную надежность и безопасность силовых выключателей серии ВГТ. Срок службы выключателей такого типа без ревизии составляет 20 лет, а общий срок службы более 40 лет.

Электромагнитные выключатели. В отличие от масляных и воздушных выключателей электромагнитные выключатели не требуют для своей работы масла или сжатого воздуха, они более просты и удобны в эксплуатации, обладают высокой надежностью и большим сроком службы. Существующие электромагнитные выключатели с узкощелевыми камерами различаются исполнением магнитных систем и формой щелевых каналов. ДУ изготавливаются с плоской и зигзагообразной щелью. Конструктивно камеры с плоской щелью просты. Однако они обла-

дают сравнительно низкой эффективностью дугогашения и применяются на напряжение 6-10 кВ. Узкощелевые зигзагообразные камеры обеспечивают более эффективное дугогашение (вследствие интенсивного охлаждения дуги) и применяются на напряжение до 24 кВ. В электромагнитном выключателе дуга гасится в камере с решеткой из керамических пластин, в которые дуга затягивается магнитным полем, возбуждаемым коммутируемым потоком. Дуга при размыкании дугогасительных контактов под действием электродинамических усилий токоведущего контура и тепловых конвекционных потоков выдувается вверх, в дугогасящую камеру, а затем растягивается.

Недостатком конструкции является образование проводящих частиц вблизи дугогасительных контактов (осевшие испарившиеся частицы контактного материала, налет копоти), что снижает электрическую прочность межконтактного промежутка. Дугогасительная катушка в системе магнитного дутья подключается в цепь тока постоянно, либо после размыкания главных контактов и образования дуги на дугогасительных контактах. В ДУ, применяемых в выключателях на большие токи, катушки магнитного дутья включаются в цепь только в процессе отключения, при отключении небольших токов (несколько ампер) начальная электродинамическая сила, действующая на дугу, мала, и не может переместить дугу в положение, при котором будут включены катушки магнитной системы. Поэтому с подвижным контактом связан поршень автопневматического дутья. При вращении подвижного контакта сжатый поршнем воздух по трубке направляет дугу и перемещает её вверх. При близких к нулю токах индукция в камере мала, что делает магнитное дутье малоэффективным. Для улучшения работы на магнитной системе устанавливается короткозамкнутый виток. При этом магнитный поток отстает по фазе от тока в катушке. В результате при подходе тока к нулю индукция не становится равной нулю, что способствует перемещению дуги и её гашению. Электромагнитные выключатели обеспечивают низкий уровень коммутационных перенапряжений, имеют сравнительно небольшой износ контактов. Эти преимущества позволяют применять их в электроустановках с частыми операциями включения и отключения. Недостатком электромагнитных выключателей является большая проводимость стенок. Узкие щели ДУ нагреваются дугой до очень высоких температур, при которых начинают проводить ток. Большой остаточный ток может приводить к пробоям по раскаленной поверхности пластин. Из-за этого номинальное напряжение электромагнитных выключателей не превышает 10 кВ.

Вакуумные выключатели. Гашение дуги в вакуумных выключателях происходит в глубоком вакууме ($1,3 \cdot 10^{-2} \div 1,3 \cdot 10^{-5}$ Па), обладающем весьма высокой электрической прочностью, вследствие чего значительно уменьшаются межконтактный промежуток и габариты ДУ по сравнению с масляными и воздушными выключателями. Вакуумная дугогасительная камера (ВДК), состоит (рис. 32) из следующих элементов: изоляционного корпуса 1, токоведущих стержней 2 с коммутирующими контактами, системы металлических экранов 3, фланцев 4 и сильфона 5.

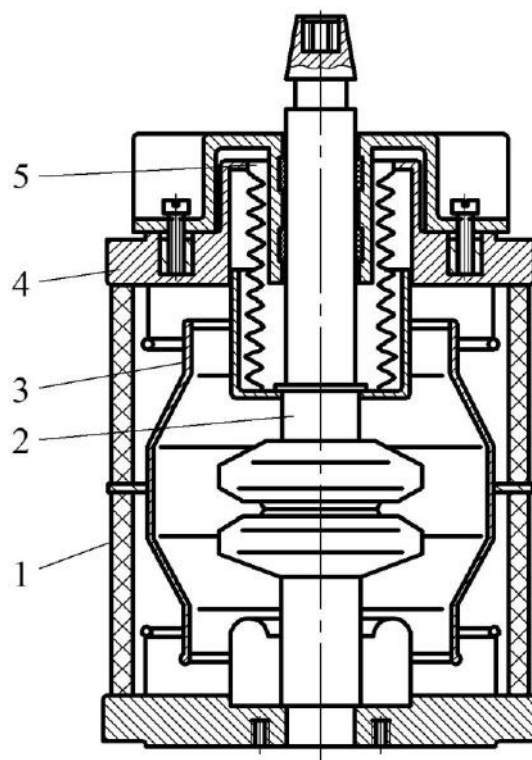


Рис. 32. Вакуумный выключатель

Изоляционный корпус обеспечивает электрическую прочность по внутренней поверхности (вакуум внутри камеры поддерживается за счет применения вакуумноплотной изоляционной керамики и герметичного сварного соединения с корпусом). Токоведущая система с коммутирующими контактами обеспечивают длительное протекание номинального тока, кратковременное (до 3 с) протекание тока КЗ и гашение дуги в процессе отключения. Система экранов обеспечивает защиту внутренней поверхности изоляционного корпуса от попадания испарившихся частиц материала контактов, выравнивание распределения напряженности поля внутри камеры. Сильфон обеспечивает свободное перемещение подвижного контакта без нарушения герметичности камеры.

Основным элементом вакуумных выключателей является ВДК. На напряжение 6, 10, 35 кВ выключается с одним разрывом на полюс, на напряжение 110 кВ и выше используется большее число ВДК. В существующих конструкциях вакуумных выключателей дугогасительные камеры могут быть произвольно ориентированы в пространстве.

Преимущества вакуумных выключателей перед другими типами выключателей:

- 1) отсутствие специальной дугогасящей среды, требующей замены;
- 2) высокая износостойкость, обеспечивающая высокий срок службы выключателей при минимальных затратах;
- 3) быстрое восстановление электрической прочности междуконтактного промежутка;
- 4) полная взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие выбросов продуктов горения окружающее пространство;

5) высокое быстродействие, обусловленное малой массой контактов и их малым ходом;

б) широкий диапазон температур от -70 до $+200$ °С.

К недостаткам этих выключателей можно отнести: возникновение больших перенапряжений при отключении индуктивной нагрузки, что может приводить к повреждению изоляции; большие трудности при создании выключателей на номинальное напряжение 100 кВ и выше, когда приходится соединять несколько разрывов последовательно; сложность разработки и изготовления, большие затраты для организации производства.

5.1.2 Выключатели нагрузки

Стоимость выключателей с приводами довольно велика. С учетом необходимых для управления выключателем ТТ и устройств релейной защиты стоимость современного РУ получается довольно большой. Если длительный ток установки невелик (400-600 А при напряжении 10 кВ), вместо выключателя с релейной защитой целесообразно использовать выключатель нагрузки и предохранители. Выключатель нагрузки имеет ДУ небольшой мощности для отключения номинальных токов. В случае КЗ используется высоковольтный предохранитель. В выключателях нагрузки для гашения дуги применяются камеры с автогазовым, электромагнитным, элегазовым дутьем и вакуумными элементами. В камерах с автогазовым дутьем гашение дуги осуществляется газами, которые выделяются под действием высокой температуры дуги стенками из газогенерирующего материала (органического стекла, винипласта и др.). Управление выключателем осуществляется ручным рычажным приводом со встроенным электромагнитом для дистанционного отключения. Если необходимо дистанционное включения, то может быть использован дополнительный электромагнитный привод. Выключатель может снабжаться дополнительным устройством, которое отключает его после срабатывания предохранителей. Это устройство приводится в действие указателем срабатывания предохранителя.

5.1.3 Разъединители, отделители, короткозамыкатели

Разъединители служат для включения и отключения цепи высокого напряжения либо при токах значительно меньших номинальных, либо в случаях, когда отключается номинальный ток, но напряжение на контактах аппарата недостаточно для образования дуги.

Разъединители являются наиболее распространенными аппаратами в РУ ВН. Их число в 2-4 раза превышает число выключателей ВН. Поэтому весьма важными характеристиками разъединителей является занимаемая ими площадь и объем, простота обслуживания, удобство проведения ремонтных и монтажных работ. Разъединители должны обладать высокой надежностью, поскольку их поврежде-

ния могут привести к серьезным авариям. Отключение разъединителем наружной установки необесточенного участка цепи недопустимо, так как открытая электрическая дуга между размыкаемыми контактами может достигнуть очень больших размеров и даже при отключении незначительных токов перекинуться на соседние фазы и заземленные конструкции, что приводит к возникновению двух- и трехфазных КЗ.

Разъединители различаются по номинальному напряжению, номинальному току, по роду установки (для внутренней или наружной); числу пар полюсов (одно-, двух- и трехполюсные); по способу управления (с ручным управлением, электрическим или пневматическим приводом); наличию или отсутствию ножей заземления; способу установки (на горизонтальной плоскости, вертикальной или наклонной); виду среды в которой размыкаются и замыкаются контакты.

По характеру движения подвижного контакта (ножа) все конструкции разъединителей можно разделить на следующие группы:

Вертикально-поворотные (рубящего типа). Движение ножа (рис. 33), происходит в плоскости, параллельной оси опорных изоляторов полюса аппарата. Они могут быть как с одним ножом, так и с двумя полуножами. В последнем случае необходимо меньшее расстояние до находящихся над ними элементов РУ (например, ошиновки). Возможна также одноколонковая конструкция с закреплением неподвижного контакта на ошиновке. При относительно большом вертикальном габарите аппарата этого типа допускают малые расстояния между полюсами, минимальное расстояние определяется электрической прочностью при перенапряжениях и требуемой электродинамической стойкостью при КЗ.

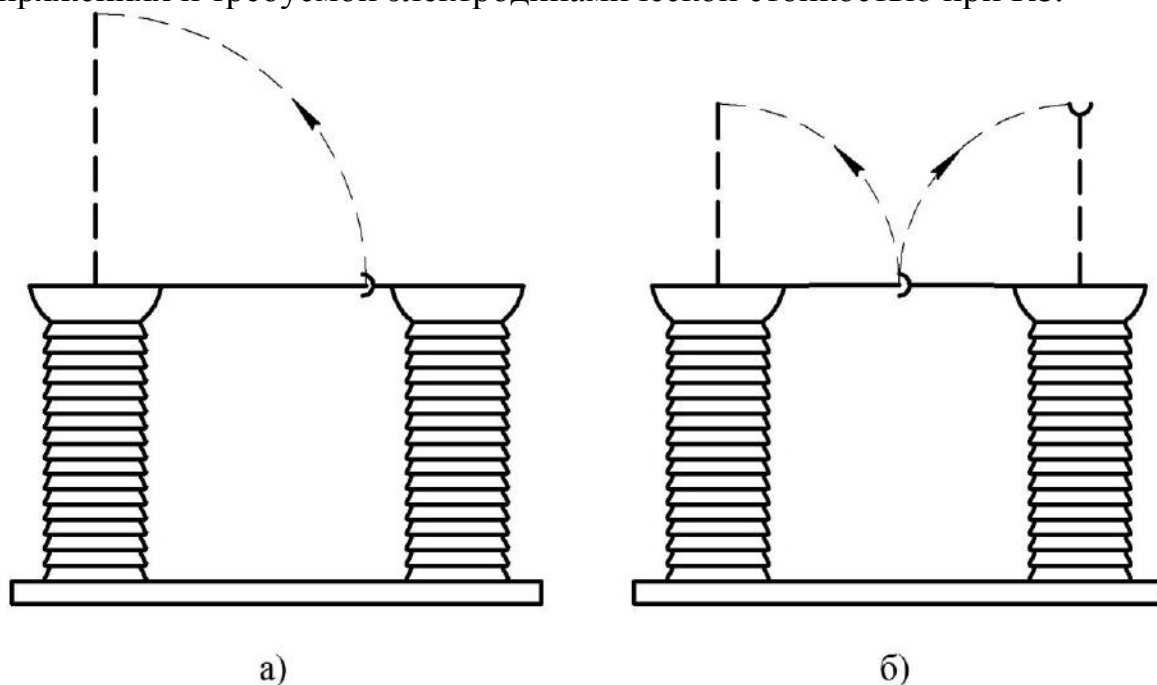


Рис. 33. Вертикально-поворотные разъединители:
а) с одним ножом; б) с двумя полуножами

Горизонтально-поворотные. Движение ножа (рис. 34) происходит в горизонтальной плоскости, перпендикулярной осям опорных изоляторов. Они применя-

ются в основном в ОРУ, так как для них необходимы значительно большие междуполюсные расстояния, чем для разъединителей других типов.

Конструкция с двумя полуножами допускает меньшее расстояние между соседними фазами, чем с одним ножом. Однако контактное соединение при этом оказывается незафиксированным на опорной изоляции.

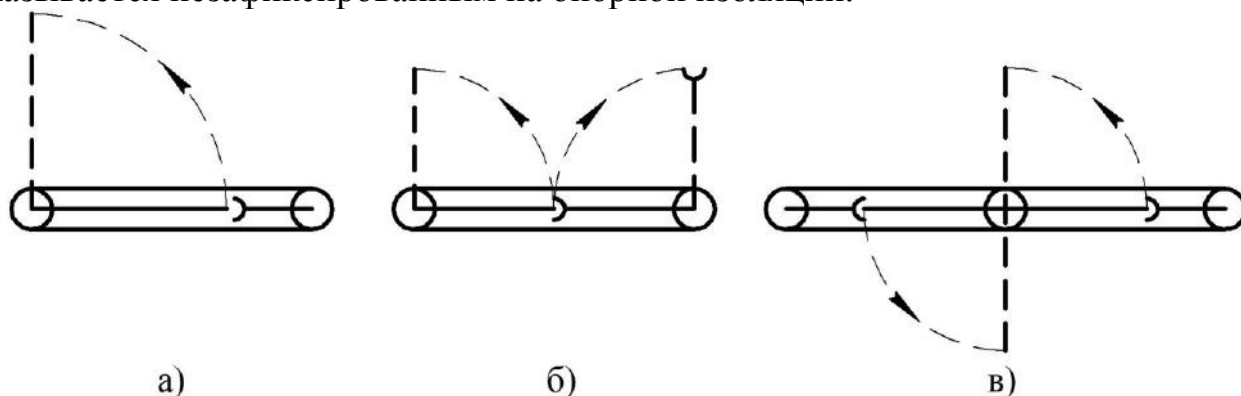


Рис. 34. Горизонтально-поворотные разъединители:
а) с одним ножом; б) с двумя полуножами;
в) с центральной поворотной колонкой

Разъединитель с центральной поворотной колонкой позволяет этого избежать, но неравномерное распределение напряжения по двум последовательным разрывам вызывает необходимость увеличения суммарного изоляционного расстояния с одноразрывной конструкцией.

Разъединители с поступательным движением ножа. Разъединители такого типа широко применяются в ЗРУ при напряжениях 20-220 кВ. На раме установлены неподвижные опорные изоляторы и вращающийся изолятор, связанный с валом привода. Неподвижные контакты имеют коробчатую форму сечения, а подвижный контакт – нож выполнен из восьми швелерообразных шин. Контактное нажатие обеспечивается пружиной. В процессе отключения, до начала поступательного движения ножа справа налево вращением изолятора приводится в действие специальный кулачковый механизм, размещенный внутри ножа и отводящий нож одновременно от обоих неподвижных контактов на 3-5 мм. После этого нож начинает перемещаться в сторону длинного неподвижного контакта вплоть до конечного положения, при котором образуется видимый промежуток между торцами шин ножа и правым неподвижным контактом. При включении все действия осуществляются в обратной последовательности.

Разъединители со складывающимися ножами. Разъединители такого типа (рис. 35), имеют неподвижный контакт, закрепленный на шинах ОРУ, подвешенных на гирляндах изоляторов к порталам.

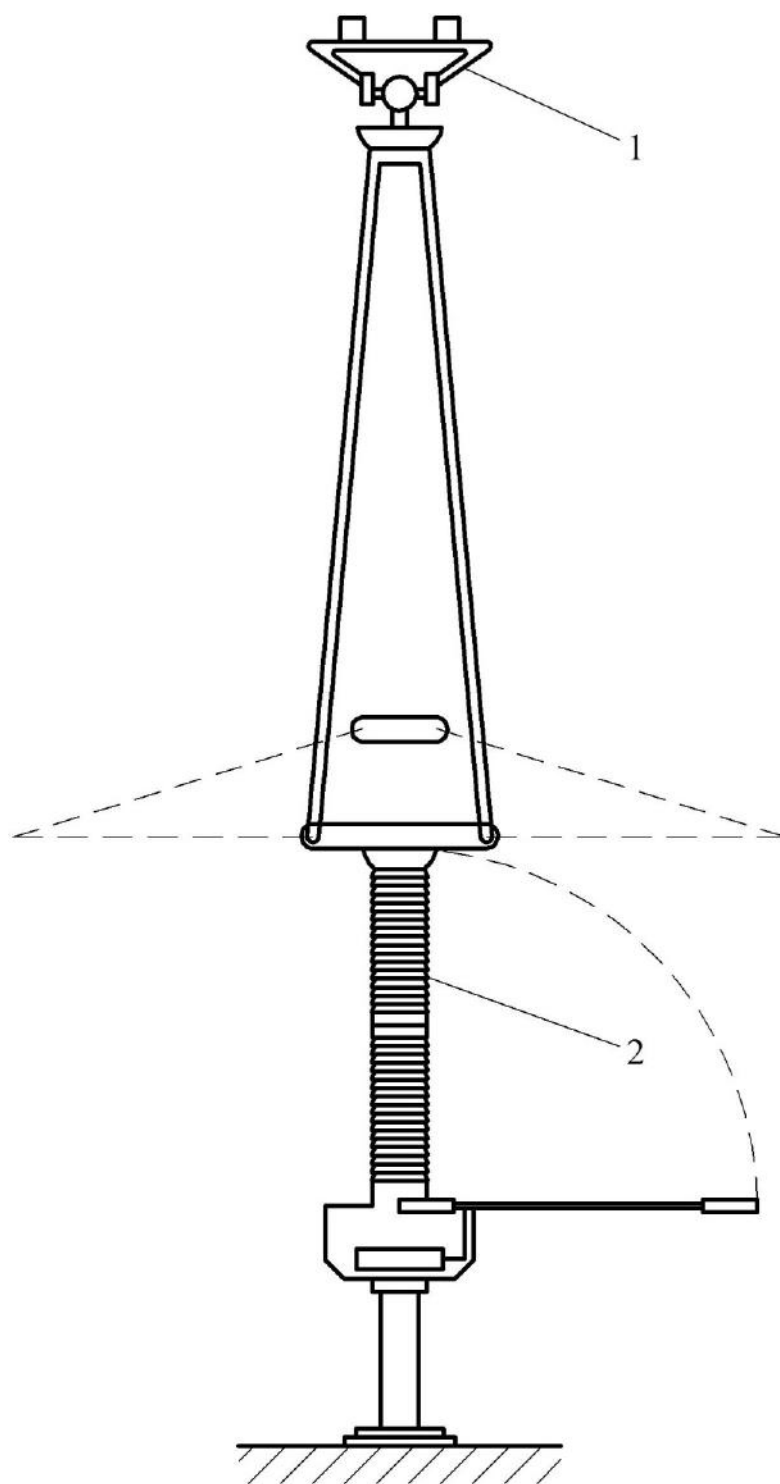


Рис. 35. Разъединитель со складывающимися ножами

Подвижный нож 1 закрепляется на колонке опорных изоляторов 2 и приводится в действие с помощью вращающейся колонки изоляторов, связанных с приводом. При этом он совершает вертикальное перемещение. Такие разъединители позволяют значительно сократить площадь ОРУ без увеличения его вертикальных габаритов.

5.1.4 Блокировка разъединителей и выключателей

Отключение разъединителя при прохождении через него тока может привести 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 разъединителя оказывается свободным только при отключенном положении механизма выключателя. При такой блокировке очень трудно связать механизм выключателя со многими приводами разъединителей. В каждом отдельном приходится конструировать свой блокирующий механизм применительно к конструкции распределительного устройства, поэтому такая 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 при отключенном состоянии выключателя, т.е. при отсутствии тока через разъединитель.

Более совершенна электромагнитная блокировка. Для операций над разъединителем ключ в виде электромагнита должен быть вставлен в замок. Концы катушки электромагнита выведены на штыревые контакты.

5.1.5 Отделители и короткозамыкатели

В целях уменьшения капитальных затрат на строительство подстанций широко применяются схемы без выключателей на стороне высокого напряжения. Для замены выключателей на стороне высокого напряжения используют короткозамыкатели и отделители.

Короткозамыкатели – это быстродействующий контактный аппарат, с помощью которого по сигналу релейной защиты создается искусственное КЗ сети. Короткозамыкатели для наружной установки, выпускаются в однополюсном исполнении на напряжения 110, 150 и 220 кВ, а также в двухполюсном исполнении на 35 кВ для сетей с изолированной нейтралью. На рис. 36 показана конструкция короткозамыкателя на 110 кВ наружной установки. На основании 7 установлен опорный изолятор 5 с неподвижным контактом 4. Подвижный контакт (нож) 3 связан с электромагнитным приводом 1 посредством систем рычагов и изоляционной тяги 2. Нож 3 при помощи гибкой связи б и шины 9 глухо соединяется с контуром заземления РУ. На шине 9 установлен трансформатор тока 10 проходного типа. Отключение короткозамыкателя осуществляется приводом, а включение — за счет включающих пружин. Основание аппарата 7 установлено на опорных изоляторах 8. Конструктивные исполнения короткозамыкателей на напряжения свыше 35 кВ аналогичны описанному выше.

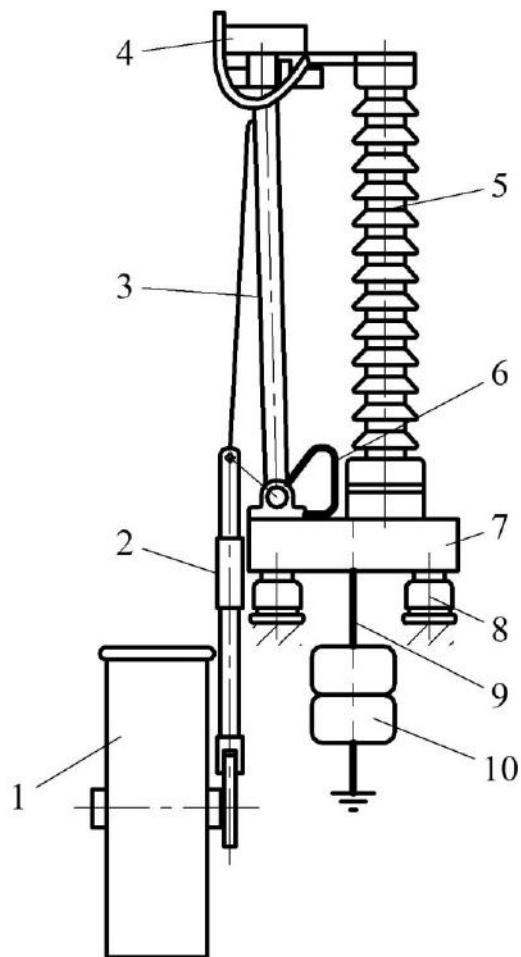


Рис. 36. Короткозамыкатель на напряжение 110кВ

Отделитель – представляет собой разъединитель, который быстро отключает обесточенную цепь после подачи команды на его привод. Процесс отключения отделителя длится 0,5-1 с. В схему (рис. 37), кроме быстродействующих короткозамыкателей $QK1$ и $QK2$, введены быстродействующие отделители $QN1$ и $QN2$, которые при нормальном режиме работы замкнуты. Допустим, вследствие ухудшения изоляции трансформатора $T1$ внутри него возникают электрические разряды, которые приводят к разложению масла и выделению газа. Из-за этого срабатывает газовое реле, по сигналу реле включается короткозамыкатель и в цепи возникает искусственное КЗ. Под действием тока КЗ срабатывает выключатель $QF1$ и обе группы $T1$ и $T2$ обесточиваются. С помощью релейной защиты отключается также выключатель $QF4$, после чего с некоторой задержкой отключается отделитель $QN1$. Если до аварии выключатель $QF4$ был отключен, то после включения выключателя $QF1$ он может быть включен, при этом будет восстановлено питание потребителей на второй секции шин.

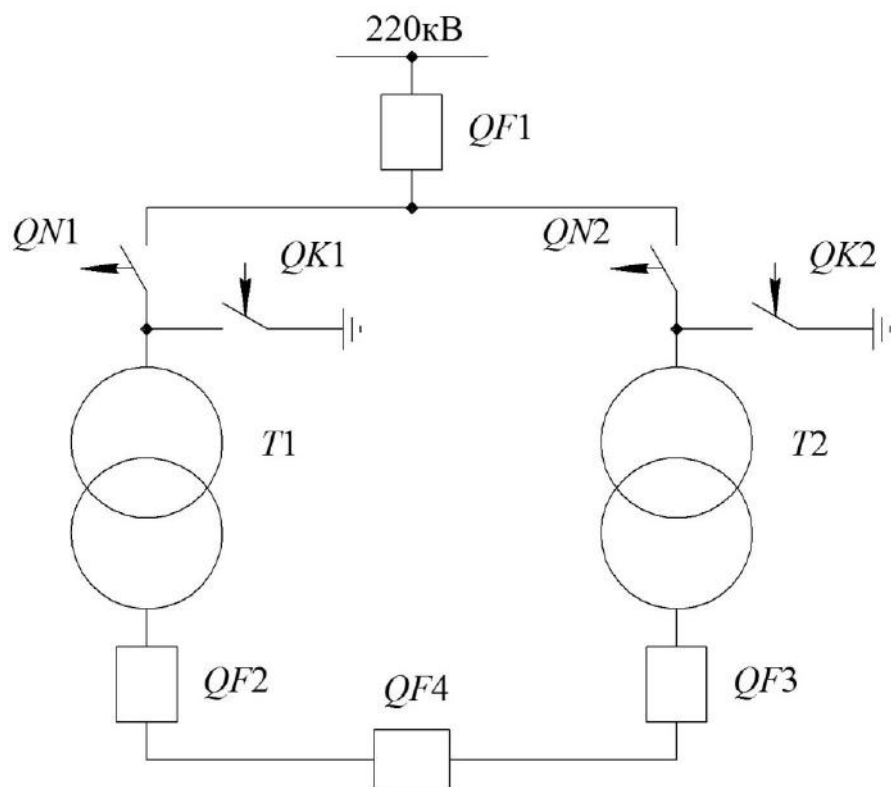


Рис. 37. Схема электрическая принципиальная с реализованными в них отделителями и короткозамыкателями

5.2 Измерительные аппараты

Измерительные ТТ и ТН применяются для осуществления непрерывного контроля за параметрами электрической цепи в качестве датчиков сигнала её состояния, воспринимаемого устройствами защиты и автоматики. Применяются также ТТ и ТН при высоких напряжениях и больших токах, когда непосредственное включение в цепь контрольно-измерительных приборов, реле и приборов автоматики технически невозможно или недопустимо по условиям безопасности обслуживающего персонала. Измерительные ТТ устанавливаются в ОРУ РНЕ и ГРУ (герметичных РУ), и связываются контрольными кабелями с приборами вторичной коммутации.

ТТ – это прибор, предназначенный для преобразования тока, у которого первичная обмотка включается в цепь последовательно, а вторичная содержит измерительные приборы, реле защиты и автоматики.

Все ТТ – для измерений и защиты – можно классифицировать по следующим основным признакам:

По роду установки: ТТ для работы на открытом воздухе (категория I по ГОСТ 15150-69), для работы в закрытых помещениях, для встраивания во внутренние полости электрооборудования (газовая среда, изолированная от наружного воздуха или трансформаторное масло, либо газовая среда, неизолированная от наружного воздуха);

По способу установки: проходные ТТ, предназначенные для использования в качестве ввода и устанавливаемые в проемах потолков, стен, механических конструкциях; опорные, встраиваемые и т.д.;

По числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом трансформации; с несколькими коэффициентами трансформации, получаемыми изменением числа витков первичной обмотки, или обеих обмоток;

По числу ступеней трансформации: одноступенчатые; каскадные (многоступенчатые), то есть с несколькими ступенями трансформации тока;

По выполнению первичной обмотки: одновитковые, многовитковые;

По роду изоляции между первичной и вторичными обмотками: изготавливаются с твердой (фарфор, литая изоляция, прессованная изоляция, полимерная, и т.д.); с вязкой (заливочные компаунды); с комбинированной (бумажно-масляная, конденсаторного типа) или газообразной (воздух, элегаз);

По принципу преобразования тока ТТ: электромагнитные и оптико-электронные.

Основные параметры и характеристики ТТ:

1) *Номинальное напряжение* – действующее значение линейного напряжения, при котором предназначен работать ТТ. Для отечественных ТТ приняты следующие значения: 0,66; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220 ... 1150 кВ.

2) *Номинальный первичный ток.* Шкала: 1; 5; 10; 15; 20; 30; ... 1000; 1500; ... 40000 А.

3) *Номинальный вторичный ток.* Принимается равным 1 А (при первичном токе до 4000 А) или 5 А. По согласованию с заказчиком допускается изготовление ТТ с номинальным вторичным током 2 или 2,5 А.

4) *Вторичная нагрузка ТТ, $Z_{2н}$,* – соответствует полному сопротивлению его внешней цепи, выраженному в Омах, с указанием коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,8$, при которой гарантируется установленный класс точности ТТ или предельная кратность первичного тока относительно его номинального значения, называемая номинальной вторичной нагрузкой ТТ. Для отечественных ТТ $Z_{2н}=2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 100$.

Соответствующее значение номинальной вторичной нагрузки для ТТ определяется

$$Z_{2н} = \frac{S_{2н\text{ ном}}}{I_{2ном}^2},$$

5) *Коэффициент трансформации ТТ* – равен отношению первичного тока ко вторичному току.

6) *Стойкость ТТ к механическим и тепловым воздействиям* характеризуется током электродинамической и термической стойкости. Ток электродинамической стойкости равен наибольшей амплитуде тока КЗ за все время его протекания, которую ТТ выдерживает без повреждений. Ток термической стойкости ТТ равен наибольшему действующему значению тока КЗ за промежуток времени t .

7) Токовая погрешность ТТ

$$\Delta I_{\%} = \frac{k_{\text{ном}} I_2 - I_1}{I_1} 100 = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} 100,$$

где I_2 – вторичный ток;

I_1 – первичный приведенный ток.

Класс точности ТТ определяется по току в процентах при первичном токе, равном 100-120 % от номинального первичного тока.

В зависимости от погрешности по ГОСТ 7746-78 различают классы точности ТТ: 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10.

В реальном ТТ существует угол между I_2 и I_1 , который называется угловой погрешностью, измеряемой в минутах. Если вторичный ток опережает первичный, то погрешность по углу положительная. Угловую погрешность необходимо учитывать при определении активной мощности, при измерениях энергии и в ряде релейных защит, работа которых зависит от угла φ .

Наряду с токовой и угловой погрешностями предусмотрена полная погрешность ε , %, она характеризует относительный намагничивающий ток.

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_{\text{ном}} i_2 - i_1)^2 dt},$$

где I_1 – действующее значение первичного тока;

i_2 – мгновенное значение первичного тока;

T – период частоты переменного тока.

Для снижения погрешностей применяется компенсация. Различают компенсацию токовой и угловой погрешности. Чаще всего необходима компенсация токовой погрешности. Эта компенсация выполняется для диапазона $(0,1 - 1,2)I_{1\text{ном}}$ и применяется в ТТ, используемых для измерений. В ТТ, используемых для релейной защиты, компенсация применяется реже.

Простейшем методом компенсации токовой погрешности является *витковая коррекция*. Если $\omega_2 = \omega_{2\text{ном}} = \omega_{1\text{ном}} k_{\text{ном}}$, то погрешность всегда имеет отрицательный знак и определяется уравнением

$$\Delta I_{\%} = -\frac{I_0 \omega_1}{F_1} \sin(\alpha + \psi) 100.$$

Если число витков вторичной обмотки уменьшить (отмотать), то при $\omega_2 < \omega_{2\text{ном}}$ коэффициент трансформации становится меньше, а вторичный ток $I_2 = I_1 \omega_1 / \omega_2$ может быть больше, чем $I_{2\text{ном}} = I_1 \omega_1 / \omega_{2\text{ном}}$. Так создается положительная погрешность по току, частично компенсирующая отрицательную.

Токовая погрешность с учетом отмотки вторичных витков

$$\Delta I_{\%} = \left[-\frac{I_0 \omega_1}{F_1} \sin(\alpha + \psi) - \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{2\text{ном}}} \right] 100.$$

Вторая составляющая в скобках является витковой коррекцией. На угловую погрешность витковая коррекция не оказывает влияния. Для уменьшения угловой погрешности на магнитопроводе ТТ устанавливается короткозамкнутый виток.

Введение такого витка вызывает увеличение активных потерь в магнитопроводе и реактивного магнитного сопротивления, в результате возрастает угол потерь ψ . При этом угловая погрешность падает, а токовая возрастает. Такую коррекцию целесообразно применять, когда по токовой погрешности имеется запас. Существуют и другие методы коррекции. Широко применяется метод шунта, – повышение магнитной проницаемости путем подмагничивания магнитопровода ТТ полями рассеивания.

Конструкции ТТ. Различают одновитковые и многovitковые ТТ. В одновитковом ТТ первичная обмотка может быть выполнена в виде стержня, шины или пакета шин. Примером такого исполнения является трансформатор типа ТПОЛ-10. Такие ТТ применяются при больших первичных токах, так как электродинамическая стойкость таких ТТ достаточно высока вследствие того, что на первичную обмотку действуют силы только от подводящих шин и соседних фаз.

При малых первичных токах (ниже 400 А) для получения высокого класса точности применяются многovitковые ТТ. При любом значении первичного тока необходимая для данного класса точности первичная МДС получается за счет увеличения числа витков первичной обмотки.

С ростом номинального напряжения стоимость ТТ возрастает пропорционально квадрату напряжения, в основном за счет изоляции. Поэтому при напряжении $U_{\text{ном}} > 220$ кВ применяются каскадные ТТ. Схема представлена на рис. 38.

Измерительные трансформаторы напряжения (ТН). ТН предназначены для преобразования высокого напряжения в низкое стандартное напряжение, удобное для измерения. Обычно за номинальное напряжение принимается напряжение 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. Первичная обмотка изолируется от вторичной на полное рабочее напряжение.

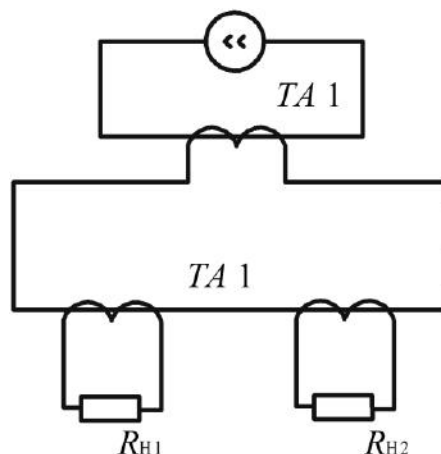


Рис. 38. Схема с реализацией трансформаторов тока

ТН можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по числу обмоток (двух- и трехобмоточные);
- 2) по числу фаз (одно- и трехфазные);
- 3) по классу точности (0,5; 1; 3);
- 4) по способу охлаждения (масляное, естественное воздушное, элегазовое);
- 5) по роду установки (для внутренней и наружной установки).

Основными номинальными параметрами ТН являются напряжения обмоток, напряжение трансформатора, равное напряжению первичной обмотки, коэффициент трансформации – отношение номинального первичного напряжения ($U_{1\text{ном}}$) к номинальному вторичному напряжению ($U_{2\text{ном}}$), вторичная нагрузка, погрешность напряжения и угловая погрешность.

Согласно ГОСТ, ТН должен удовлетворять заданным классам точности при следующих условиях:

- 1) изменение мощности, отдаваемой вторичной обмоткой, в пределах от $0,25 \left(\frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} \right)^2 P_{\text{ном}}$, до $\left(\frac{U_1}{U_{1\text{ном}}} \right)^2 P_{\text{ном}}$;
- 2) коэффициент мощности нагрузки 0,8.

Погрешность ТН обусловлена наличием активных и реактивных сопротивлений обмоток и тока холостого хода. Компенсация погрешности напряжения осуществляется путем уменьшения числа витков первичной обмотки. Угловую погрешность можно компенсировать с помощью специальных компенсирующих обмоток. При активной нагрузке вносится положительная коррекция. При индуктивной – отрицательная коррекция. При напряжении до 35 кВ конструкции ТН и силовых трансформаторов одинаковы.

Перспективным является отказ от масляной изоляции. В этом случае применяется заливка ТН эпоксидным компаундом. ТН с литой изоляцией пожаробезопасны, удобны в передвижных установках и КРУ.

5.2.1 Оптоэлектронные ТТ и ТН

Существующие электромагнитные ТН и ТН из-за индуктивной связи между обмотками и потерь в магнитопроводе не могут полностью отвечать требованиям по быстродействию, надежности и возможности получения информации об измеряемом параметре с высокой степенью точности, что особенно проявляется при измерениях тока в аварийных и переходных режимах при рабочем напряжении 330 кВ и выше. Решение возможно на основе оптико-электронных методов вместо электромагнитных. Физическую основу оптико-электронных методов измерения (рис. 39), составляют процессы преобразования измеряемого оптического сигнала в выходной электрический.

Принцип действия оптико-электронного ТТ (ОЭТТ), основанного на использовании модулятора Фарадея в качестве первичного преобразователя тока, заключается в следующем: свет от источника параллельным пучком поступает на сторону высокого напряжения, где с помощью призм поворачивается в обратном направлении и проходит через поляризатор и первичную ячейку Фарадея, содержащую кристалл тяжелого флинта, с намотанной на него обмоткой с измеряемым током, расположенной на стороне высокого напряжения.

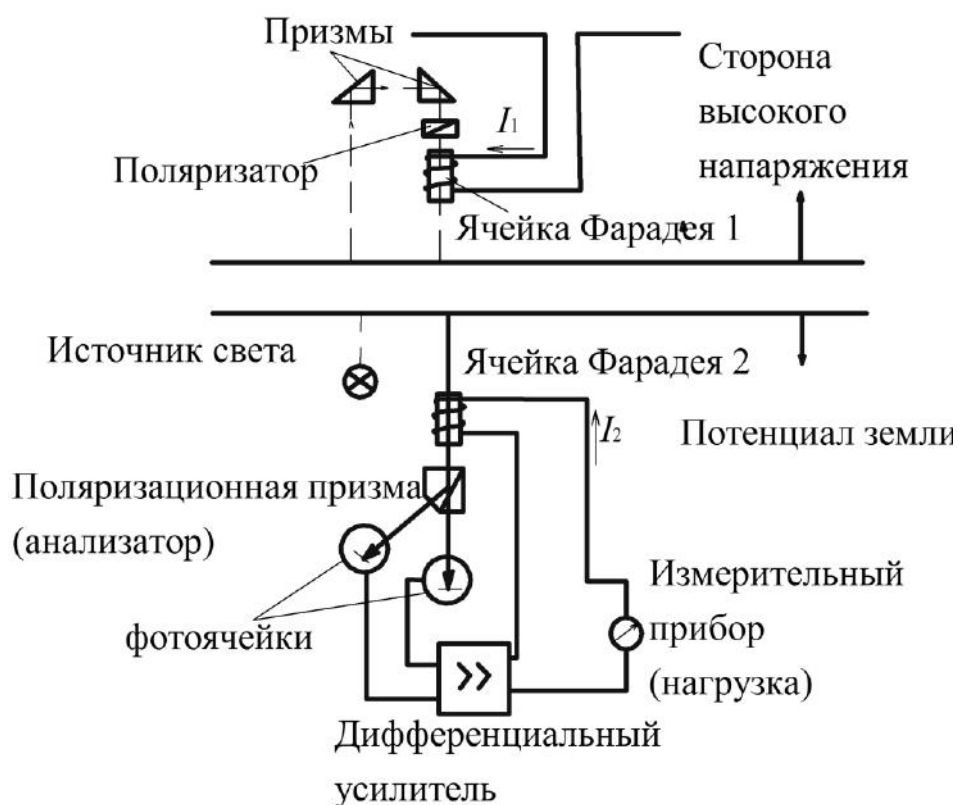


Рис. 39. Эффект Фарадея

Под действием магнитного поля, создаваемого обмоткой с измеряемым током, плоскость поляризации поляризованного луча света поворачивается на угол Θ , пропорциональный измеряемому току I_1 . Далее луч света проходит через вторичную ячейку с намотанной на неё вторичной обмоткой в направлении, противоположном первичной, таким образом, чтобы её F_2 равнялась первичной F_1 . Вторичный ток направлен так, что он компенсирует поворот плоскости луча света. Метод работы ОЭТТ заключается в постоянном приведении плоскости поляризации света в исходное положение с помощью второй ячейки, расположенной на стороне низкого напряжения. Анализатор контролирует разницу между первичной и вторичной МДС, которая проявляется в изменении силы света, получаемой фотоячейкой. Разность МДС вызывает немедленное изменение вторичного тока, стремящееся компенсировать эту разность, то есть соблюдается равенство $F_1 = F_2$.

5.2.2 Оптоэлектронный трансформатор напряжения

Для высокочастотных измерений применяются оптико-электронные ТН (ОЭТН), в качестве основного элемента которых принята ячейка Погкельса. По интенсивности поток (рис. 40), от источника света 1 формируется оптической системой 2 в параллельный пучок лучей, который по оптическому каналу связи (ретранслятору) 3 передается на сторону ВН, где с помощью поворотных призм 4 поступает в модулятор Погкельса 5, содержащий последовательно расположенные поляризатор 6, управляемый измеряемым параметром (напряжением) элемент

– ячейку Поккельса 7 и анализатор 8. Модулированный по интенсивности световой поток 3 по оптическому каналу передается на землю в приемную оптическую систему 10, которая направляет его в фотоприемник 11. Выходной сигнал фотоприемника i , пропорциональный напряжению U , может быть подан, при необходимости, на усилитель 12 и далее на исполнительные приборы 13.

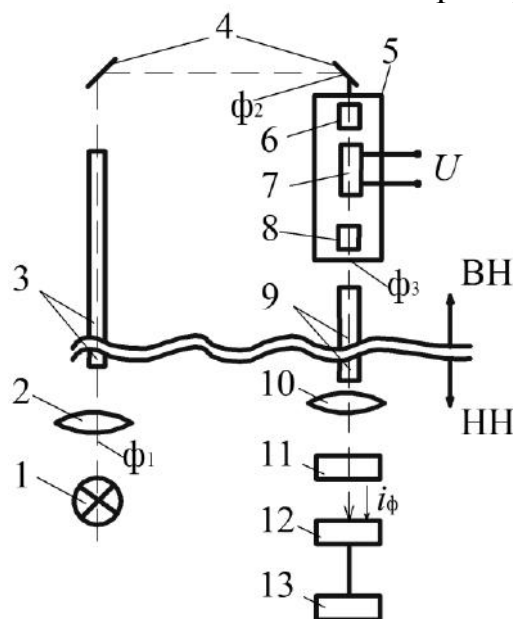


Рис. 40. Эффект Поккельса

6 КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

6.1 Контакторы

Контактор представляет собой электрический аппарат, предназначенный для коммутации силовых электрических цепей. Замыкание и размыкание контактов контактора осуществляется чаще всего под воздействием электромагнитного привода. Контактор (рис. 41), имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, электромагнит и систему вспомогательных контактов.

Категории применения современных контакторов различают в зависимости от характера нагрузки.

Контакторы переменного тока:

АС1 – активная и малоиндуктивная нагрузка;

АС2 – пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением;

АС3 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке;

АС4 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных и медленно вращающихся двигателей.

Контакторы постоянного тока:

DC1 – активная и малоиндуктивная нагрузка;

DC2 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

DC3 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением при неподвижном или медленно вращающемся роторе;

DC4 – пуск электродвигателей с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

DC5 – пуск электродвигателей с последовательным возбуждением, их отключение при неподвижном или медленно вращающемся роторе.

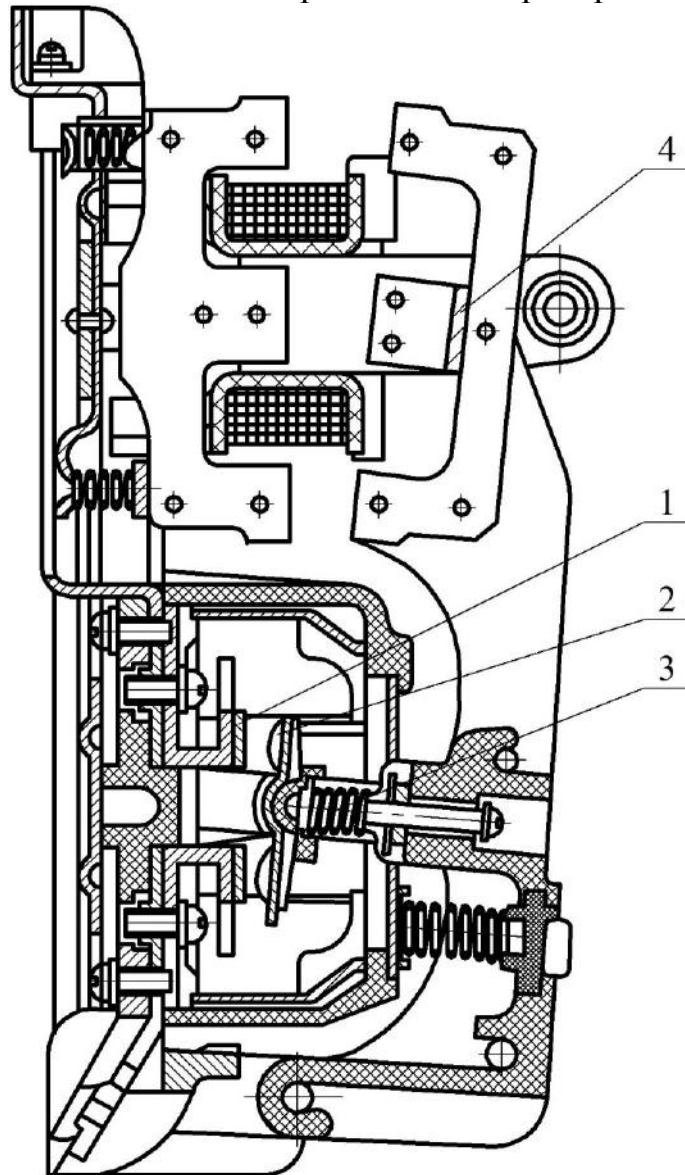


Рис. 41. Контактор серии ПА

Основными техническими данными контакторов являются номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение коммутируемой цепи, механическая и коммутационная износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения и отключения контактора.

Механическая износостойкость определяется числом циклов включения-отключения контактора без ремонта и замены его узлов и деталей.

Коммутационная износостойкость определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов.

Собственное время включения состоит из времени нарастания потока в электромагните контактора до значения потока трогания и времени движения якоря. Это время определяется темпом нарастания магнитного потока.

Собственное время отключения – время с момента обесточивания контактора до момента размыкания его контактов. Оно определяется временем спада потока от установившегося значения до потока размыкания.

Номинальный ток контактора представляет собой ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течение 8 ч без коммутаций, причем превышение температуры различных частей контактора не должно быть больше допустимого.

Номинальный рабочий ток контактора – это допустимый ток через его главные контакты в конкретных условиях.

Номинальным напряжением называется наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор.

6.2 Магнитные пускатели

Магнитным пускателем называется электрический аппарат, предназначенный для пуска и отключения короткозамкнутых асинхронных двигателей. Как правило, в пускатель помимо контактора встроены тепловые реле для защиты двигателя от токовых перегрузок и «потери фазы». Работа асинхронных двигателей в значительной степени зависит от таких свойств пускателей, как износостойкость, коммутационная способность, надежность защиты двигателя от перегрузок. В процессе эксплуатации довольно часто обрывается одна из фаз трехфазного питающего напряжения, например, из-за перегорания предохранителя. К двигателю при этом подводятся только две фазы, и ток в статоре резко возрастает, что приводит к выходу его из строя из-за нагрева обмотки до высокой температуры. Тепловые реле пускателя от этих токов должны срабатывать, и отключать двигатель. Пример схемы на базе нереверсивного пускателя приведен на рис. 42.

Главные контакты *КМ1-КМ3* пускателя включены последовательно с предохранителями *FU1-FU3*. Катушка *КМ* контактора подключается к сети через контакты тепловых реле и кнопок управления «Пуск» и «Стоп». БК – блок-контакт, обеспечивающий самоподхват катушки.

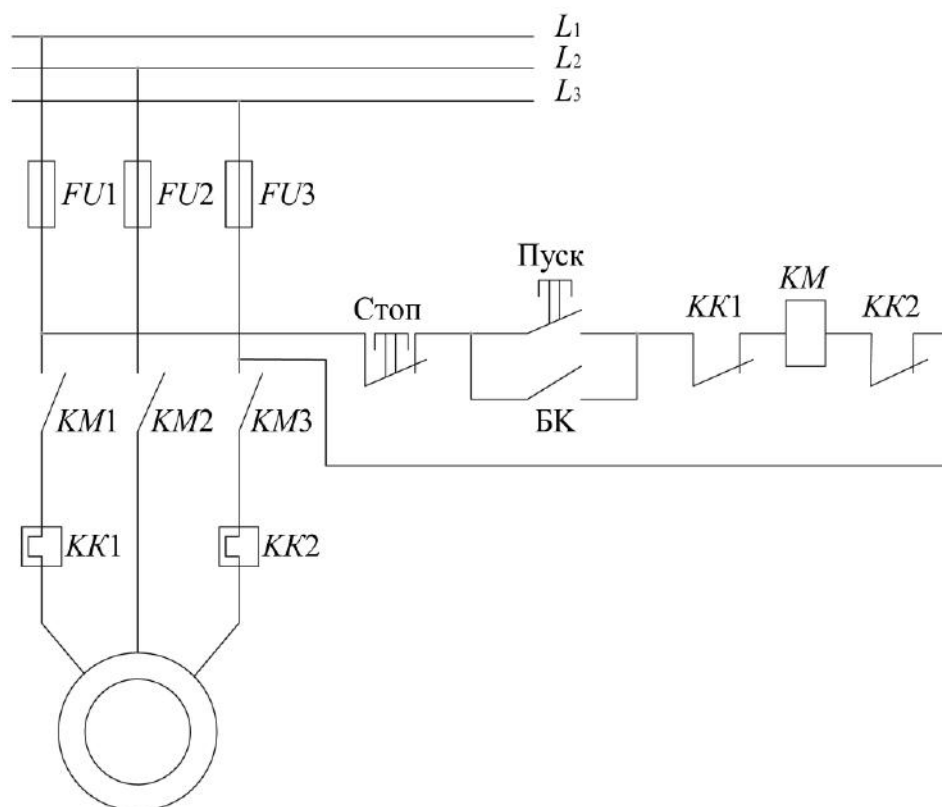


Рис. 42. Схема пуска электродвигателя с помощью нереверсивного пускателя

7 ГЕРКОНОВЫЕ РЕЛЕ

Наименее надежным узлом электромагнитных реле является контактная система. Электрическая дуга или искра, образующиеся при размыкании и замыкании контактов, приводят к их быстрому разрушению. Этому также способствуют окислительные процессы и покрытие контактных поверхностей пылью и т.д. Все эти недостатки, привели к созданию реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами (герконами). Простейшее герконовое реле изображено на рис. 43.

Контактные сердечники (КС) 1 и 2 изготавливаются из ферромагнитного материала с высокой магнитной проводимостью (пермаллоя) и ввариваются в стеклянный герметичный баллон 3. Баллон заполнен инертным газом – азотом или азотом с добавкой водорода. Баллон размещается в обмотке 4, при подаче тока в обмотке возникает магнитный поток Φ , который проходит по КС 1 и 2, через рабочий зазор δ между ними, и замыкается по воздуху вокруг обмотки 4. Поток при прохождении через рабочий зазор создает тяговую электромагнитную силу P , которая, преодолевая упругость КС, соединяет их между собой. При отключении обмотки магнитный поток и электромагнитная сила спадают и под действием сил упругости КС размыкаются. В герконовых реле отсутствуют детали, подверженные трению.

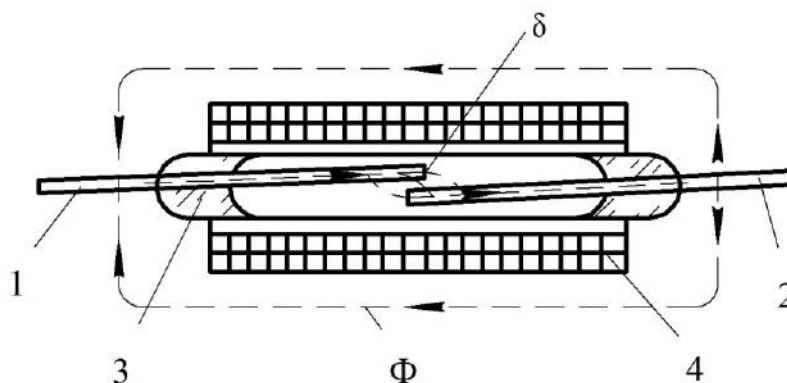


Рис. 43. Простейшее герконовое реле

Управлять герковым реле можно не только с помощью магнитного поля, созданного катушкой, но и поля постоянного магнита. Такой способ распространен в современных слаботочных аппаратах управления.

Так как КС герконов выполняют функции возвратной пружины, им придают определенные свойства. Упругость КС обуславливает возможность их вибрации после удара, который сопутствует срабатыванию. Длительность такой вибрации может достигать 0,25 мс при общем времени срабатывания 0,5-1 мс. Одним из способов устранения влияния вибрации является использование жидкометаллических контактов. В переключающем герконе внутри подвижного КС 1 имеется капиллярный канал, по которому из нижней части баллона 4 поднимается ртуть 5. Ртуть смачивает поверхность касания КС 1. В момент удара контактов при срабатывании возникает их вибрация. Из-за ртутной пленки на контактной поверхности КС 1 вибрация не приводит к разрыву цепи.

В контактной системе, изображенной на рис. 44 между КС 2, КС 3 и ртутью 5 находится ферромагнитная изоляционная жидкость 6. При возникновении магнитного поля ферромагнитная жидкость 6 перемещается вниз, в положение, при котором поток будет наибольшим. Ртуть вытесняется вверх и замыкает КС 2 и КС 3.

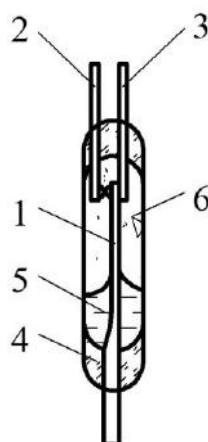


Рис. 44. Герконовое реле с жидкометаллическими контактами

Преимущества герконовых реле:

- возможность работы в условиях повышенной влажности и т.д.;
- относительная простота конструкции, малые размеры и габариты;
- высокое быстродействие (1-3 мс);
- отсутствие трущихся деталей сложных кинематических пар, что обеспечивает надежность работы;
- возможность управления, как электромагнитным полем, так и полем постоянного магнита.

Недостатки герконов:

- сравнительно низкая чувствительность по МДС управления;
- восприимчивость к внешним магнитным полям, что требует специальных мер по защите от их воздействия;
- хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам, вибрациям, требуются специальные меры по амортизации установки герконов;
- малая мощность коммутируемых цепей;
- возможность самопроизвольного размыкания контактов при больших токах.

8 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

8.1 Классификация реле

Под *реле* понимают такой электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) параметра до определенной, наперед заданной величины, происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) параметра.

По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода, защиты энергосистем.

По принципу действия реле делятся на электромагнитные, поляризованные, тепловые, магнитоэлектрические, полупроводниковые и др.

В зависимости от входного параметра реле можно выделить реле тока, напряжения, мощности, частоты и т. д. Также 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 применяют другое, так называемое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется 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 бесконтактного реле является резкое изменение сопротивления, включенного в управляемую цепь. То есть 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 называется открытым.

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

На рис. 45 по оси абсцисс отложено значение входного параметра x , а по оси ординат – выходного параметра y . Значение входного параметра, при котором происходит срабатывание реле, называется параметром (напряжением, током и т.д.) срабатывания. До тех пор пока $x < x_{\text{ср}}$, выходной параметр y равен нулю, либо своему минимальному значению y_{min} (для бесконтактных реле). При $x_{\text{ср}}$ выходной параметр скачком меняется до y_{max} . Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания реле уменьшать значение входного параметра, то при $x < x_{\text{отп}}$ происходит скачкообразное возвращение выходного параметра от значения y_{max} до 0 или y_{min} – отпускание реле.

Значение входного параметра, при котором происходит скачкообразное реле, называется параметром отпускания. Значения параметров срабатывания или отпускания, на которые отрегулировано реле, называются установкой по входному параметру. Время с момента подачи команды на срабатывание до момента начала возрастания выходного параметра называется временем срабатывания.

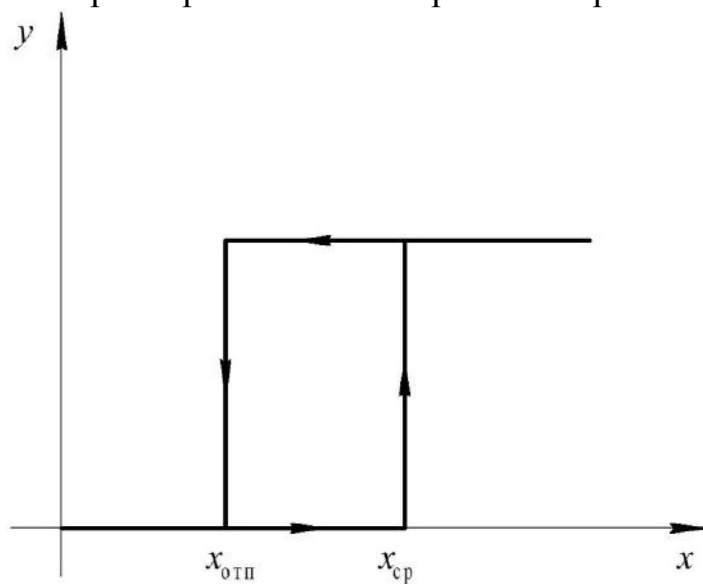


Рис. 45. Зависимость входных параметров от выходных параметров реле

Это время зависит от конструкции реле, схемы его включения и входного параметра. Для ряда реле очень важно отношение $x_{\text{отп}} / x_{\text{ср}}$, называемое *коэффициентом возврата*. Время с момента подачи команды на отключение до достижения минимального значения выходного параметра называется временем отключения. Важным параметром, характеризующим усилительные свойства реле, является отношение максимальной мощности в цепи управления P_y к минимальной

мощности входного сигнала $P_{\text{ср}}$ при котором происходит срабатывание реле. Для контактных реле максимальная мощность P_y определяется не длительным током, допустимым для данного контакта, а током нагрузки, который может быть многократно отключен.

Требования, предъявляемые к реле, в значительной степени определяются их назначением. К реле защиты энергосистем:

- 1) селективность (способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы);
- 2) быстроедействие (позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии);
- 3) чувствительность – минимальное значение входного параметра, при котором реле срабатывает (позволяет сократить длину ЛЭП, которая не может быть защищена от аварийных режимов);
- 4) надежность.

Реле для защиты энергосистем эксплуатируются, как правило, в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, а также пыли и газов, вызывающих коррозию. Из-за того, что аварийные режимы в системе редки, к этим реле не предъявляются высокие требования в части износостойкости.

К реле для схем автоматики, а также для управления и защиты электропривода предъявляются самые разнообразные специфические требования. Эти реле работают в тяжелых условиях эксплуатации. Число включений в час достигает 1000 и более. Поэтому такие реле должны иметь высокую механическую и электрическую прочность.

8.2 Реле для защиты энергосистем

В схемах защиты энергосистем и крупных силовых установок (мощные двигатели, трансформаторы) широко применяются реле серии РТ-40. Обмотка такого реле разбита на две секции и, при необходимости, может быть включена параллельно или последовательно. Ток срабатывания может регулироваться в 4 раза изменением натяга спиральной противодействующей пружины. При переключении последовательного соединения секций на параллельное ток срабатывания увеличивается в 2 раза. Такие реле выпускаются на токи от 0,2 до 200 А. Время срабатывания составляет 0,03 с при $I = 3I_{\text{ср}}$.

Коэффициент возврата реле $k \geq 0,7$, и уменьшается по мере увеличения силы тока противодействующей установки. Мощность коммутируемой цепи – около 50 Вт постоянного тока при напряжении 220 В.

8.3 Реле тока и напряжения для управления и защиты электропривода

Реле постоянного тока серии РЭВ-300 с высоким коэффициентом возврата выпускаются и как реле напряжения, и как реле тока. Магнитопровод выполнен из круглого прутка *U*-образной формы. Обмотка выполняется из медной шины. Уставка по току срабатывания регулируется в пределах 30-65% изменением начального сжатия пружины. Установка срабатывания реле напряжения меняется в пределах 30-50%. При увеличении сжатия пружины растет напряжение срабатывания и изменяется коэффициент возврата. Увеличение быстродействия реле напряжения достигается низким номинальным напряжением обмотки (24, 48 В) и последовательным включением добавочного резистора из константана. Добавочный резистор позволяет увеличить напряжение срабатывания реле. Сопротивление его выбирается так, чтобы ток срабатывания лежал в пределах $0,3I_{\text{ном}} \leq I_{\text{ср}} \leq 0,5I_{\text{ном}}$. Чем больше отношение $I_{\text{ср}}/I_{\text{ном}}$, тем больше время срабатывания. Добавочный резистор уменьшает зависимость напряжения срабатывания от температуры.

8.4 Реле защиты электропривода

Схема защиты электродвигателя постоянного тока с помощью реле максимального тока приведена на рис. 46.

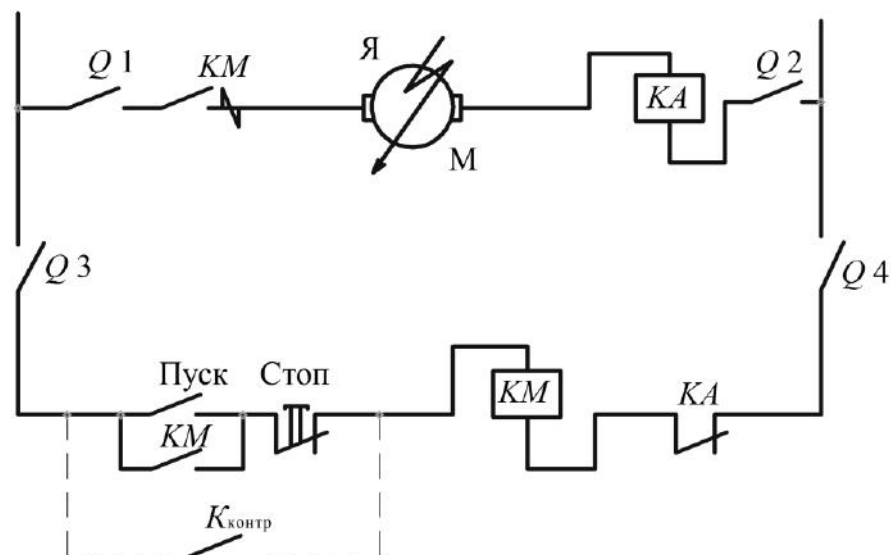


Рис. 46. Упрощенная схема защиты электродвигателя постоянного тока с помощью реле максимального тока

Рубильники *Q1* и *Q2* подключают цепь якоря к питающей сети, а рубильники *Q3* и *Q4* подают напряжение на цепь управления контактора *КМ*. При КЗ в обмотке якоря двигателя *М*, срабатывает максимальное реле тока *КА* и размыкает свои контакты в цепи катушки контактора *КМ*. При этом обесточивается цепь

якоря двигателя. Так как ток в якоре стал равным нулю, реле КА отпускает, контакты его замыкаются, и цепь катушки контактора подготавливается к следующему включению. При отключении контактора его блок-контакт *КМ* размыкается, поэтому при замыкании контактов *КА* контактор *КМ* не включится вновь. Характерным для этой схемы является полное обесточивание реле *КА* за счет отпуска контактора, поэтому коэффициент возврата может быть невысоким.

Основными требованиями, предъявляемыми к реле защиты электропривода являются высокое быстродействие ($t_{cp} \leq 0,05$ с), широкая регулировка тока срабатывания, вибро- и ударостойкость. Реле серии РЭВ используется для защиты от токов КЗ, а в совокупности с реле времени – для защиты от токовых перегрузок. Реле могут использоваться как промежуточные. Токовые реле работают с разомкнутой магнитной системой без короткозамкнутого витка на полюсе. Реле напряжения, как правило, реагируют на исчезновение напряжения питания. Поэтому в исходном положении реле якорь находится в притянутом положении. Для устранения вибрации якоря на полюсный наконечник устанавливается короткозамкнутый виток. Катушки токового реле выполняются на номинальные токи от 2,5 до 600 А.

8.5 Поляризованные реле

В поляризованных реле (рис. 47), кроме основного потока, создаваемого катушкой, действует дополнительный поляризующий магнитный поток, который создается установленным в реле постоянным магнитом. Благодаря поляризирующему потоку направление электромагнитного усилия, действующего на якорь, изменяется в зависимости от направления тока в катушке.

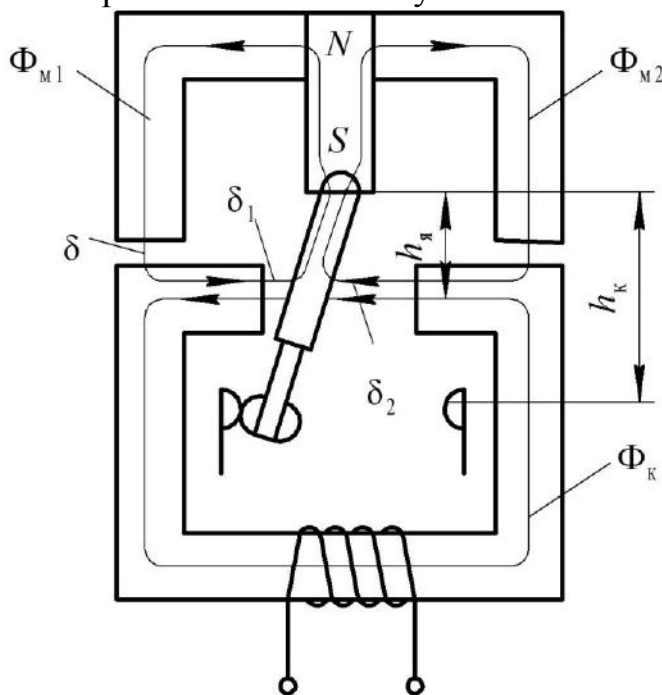


Рис. 47. Поляризованное реле

Потоки постоянного магнита в зазорах δ_1 и δ_2 :

$$\Phi_{m1} = \frac{F_m}{R_{\delta1} + R_{\delta}},$$

$$\Phi_{m2} = \frac{F_m}{R_{\delta2} + R_{\delta}},$$

где F_m – МДС постоянного магнита;

$R_{\delta1}, R_{\delta2}, R_{\delta}$ – магнитное сопротивление зазоров.

Магнитный поток, создаваемый катушкой

$$\Phi_k = \frac{F_k}{R_{\delta1} + R_{\delta}},$$

где F_k – МДС катушки.

Результирующее усилие, действующее на якорь, равно разности усилий, создаваемых в зазорах δ_1 и δ_2 .

Поляризованные реле имеют следующие преимущества перед нейтральными:

- 1) выходное состояние контактной системы зависит от полярности управляющего импульса, что расширяет функциональные возможности реле;
- 2) реле могут управляться кратковременными импульсами тока;
- 3) замкнутое состояние сохраняется после окончания управляющего импульса, что позволяет использовать реле как элемент памяти;
- 4) после срабатывания не потребляется мощность для удержания якоря в притянутом положении;
- 5) высокие чувствительность и коэффициент усиления по мощности;
- 6) за счет положения упоров можно осуществлять однопозиционную, нейтральную и двухпозиционную настройку реле.

8.6 Тепловые реле

Долговечность энергетического оборудования в значительной степени зависит от перегрузок, которым оно подвергается во время работы. При номинальном токе допустимая длительность его протекания стремится к бесконечности. Протекание тока, превышающего номинальный, приводит к дополнительному повышению температуры и дополнительному старению изоляции, поэтому чем больше ток перегрузки, тем меньше её длительность.

Применение тепловых реле целесообразно при длительности включения двигателя, превышающей 30 мин. Для защиты оборудования от токовых перегрузок широко распространены тепловые реле с биметаллическим элементом. Биметаллический элемент состоит из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения α . В месте прилегания друг к другу пластины жестко закреплены. Если такой элемент нагреть, то произойдет его изгиб в сторону с меньшим α . Широкое распространение в тепловых реле получили такие материалы, как инвар (малое значение α) и хромоникелевая сталь (большое значение α).

Для получения большого прогиба необходим элемент большой длины и малой толщины. В то же время при необходимости получения большого усилия целесообразно иметь широкий элемент с малой длиной и большой толщиной. Нагрев биметаллического элемента может производиться за счет тепла, выделяемого током нагрузки в самой пластине или в специальном нагревателе. Лучшие характеристики получаются при комбинированном нагреве, когда пластина нагревается за счет проходящего через нее тока и за счет тепла, выделяемого специальным нагревателем, обтекаемым тем же током.

Основной характеристикой теплового реле является зависимость времени срабатывания от тока нагрузки (времятоковая характеристика).

Из-за инерционности тепловые реле непригодны для защиты цепей от токов КЗ. При КЗ нагрев биметаллического элемента идет без отдачи тепла, и нагревательные элементы могут сгореть до срабатывания реле.

Температура биметаллического элемента зависит от температуры окружающей среды, с ростом которой ток срабатывания реле уменьшается. Для номинальной температуры (+40 °С)

$$I_{\text{ср.ном}}^2 = \alpha(\Theta_{\text{ср}} - \Theta_{\text{ном}}),$$

где $I_{\text{ср.ном}}$ – ток срабатывания реле при номинальной температуре $\Theta_{\text{ном}}$;

$\Theta_{\text{ср}}$ – температура биметаллического элемента, при которой срабатывает реле.

При температуре, отличной от номинальной

$$I_{\text{ср}}^2 = \alpha(\Theta_{\text{ср}} - \Theta).$$

Тогда

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{ср.ном}} \sqrt{\frac{\Theta_{\text{ср}} - \Theta}{\Theta_{\text{ср}} - \Theta_{\text{ном}}}}.$$

При температуре окружающей среды, сильно отличающейся от номинальной, необходимы либо дополнительная (плавная) регулировка реле, либо подбор нагревательного элемента с учетом этой температуры. Для того чтобы температура окружающей среды меньше влияла на ток срабатывания, значение $\Theta_{\text{ср}}$ необходимо выбирать возможно большим. Тепловые реле желательно располагать в одном помещении с защищаемым объектом. Нельзя располагать реле вблизи концентрированных источников тепла – нагревателях печей, систем отопления и т.д.

8.7 Позисторная защита двигателей

Трудности при согласовании характеристик тепловых реле и защищаемого объекта привели к созданию тепловой защиты, реагирующей непосредственно на температуру защищаемого объекта. При этом датчики температуры устанавливаются на обмотке двигателя. В качестве датчиков температуры широкое применение получили термисторы и позисторы. Термисторы представляют собой резисторы с довольно большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При увеличении температуры сопротивление термистора уменьша-

ется, что используется для схемы отключения двигателя. Для увеличения крутизны зависимости сопротивления от температуры термисторы, наклеенные на три фазы, включаются параллельно.

Позисторы являются нелинейными резисторами с положительным температурным коэффициентом сопротивления. При достижении определенной температуры сопротивление позистора скачкообразно увеличивается на несколько порядков. Для увеличения этого эффекта позисторы разных фаз соединяются последовательно.

Защита с помощью позисторов является более совершенной. В зависимости от класса изоляции обмоток двигателя берутся позисторы на температуру срабатывания $\Theta = 105, 115, 130, 145$ и 160 °С. Эта температура называется классификационной. Позистор резко меняет сопротивление при температуре, превышающей классификационную на 20 градусов, за время, не превышающее 12 с. Гарантийный срок службы 20000 часов.

8.8 Выбор реле

а) выбор максимально-токовых реле

1) $I_{\text{ном.р}} \geq I_{\text{ном.двиг.}}$

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме

$$I_{\text{ном}} = I_{\text{ном.дв25}},$$

где $I_{\text{ном.дв25}}$ – номинальный ток двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме при ПВ = 25%.

2) Уставка реле по току срабатывания должна быть

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

Для защиты двигателей с фазным ротором

$$I_{\text{уст}} \geq (2,25 - 2,5) I_{\text{пуск.}}$$

б) выбор тепловых реле

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

$$I_{\text{ном.нагр}} = I_{\text{ном.двиг.}}$$

Работа теплового реле зависит от условий охлаждения. Поэтому температура окружающей среды учитывается по формуле

$$I_{\text{ном.нагр.}\Theta} = I_{\text{ном.нагр}} \left(1 - \frac{\delta}{100} \frac{\Theta - \Theta_{\text{ном.окр.}\Theta}}{10} \right),$$

где δ – коэффициент, учитывающий изменение номинального тока нагревателя на каждые 10 °С разности $\Theta - \Theta_{\text{ном.окр.}}$.

Если реле находится на открытом воздухе, например вне кожуха пускателя, то номинальный ток нагревателя берется на 15-20 % меньше.

8.9 Электромеханические реле времени

В схемах защиты и автоматики часто требуется выдержка между срабатыванием двух или нескольких аппаратов. При автоматизации технологических процессов также может возникнуть необходимость в определенной временной последовательности операций. Для создания выдержки времени служат электрические аппараты, называемые реле времени.

Общими требованиями, предъявляемыми к реле времени являются:

- 1) стабильность выдержки времени при колебаниях напряжения, частоты питания, температуры окружающей среды, при воздействии других факторов;
- 2) малые потребляемая мощность, масса габариты.

Возврат реле в исходное положение происходит, как правило, при его обесточивании. Поэтому коэффициент возврата может быть очень низким.

В зависимости от назначения к реле времени предъявляются специфические требования. Для схем автоматического управления электроприводами при большой частоте включений требуются реле с высокой механической износостойкостью – до $(5 - 10) \cdot 10^6$ срабатываний. Требуемые выдержки времени находятся в пределах 0,25-10 с. К этим реле не предъявляются требования относительно высокой стабильности выдержки времени, разброс времени срабатывания может достигать 10%.

Реле для защиты энергосистем должны иметь высокую точность выдержки времени. Эти реле работают относительно редко, поэтому к ним не предъявляются особые требования по износостойкости. Износостойкость реле времени защиты составляет $(5 - 10) \cdot 10^3$. Выдержка времени таких реле составляет 0,1-20 с.

Для автоматизации технологических процессов необходимы реле с большой выдержкой времени – от нескольких минут до нескольких часов. В этом случае, как правило, используются моторные реле времени. В настоящее время созданы полупроводниковые реле времени с таким же большим диапазоном выдержки времени.

8.10 Реле времени с механическим замедлением

а) реле с пневматическим замедлением анкерным механизмом

В таких реле электромагнит постоянного или переменного тока воздействует на контактную систему через замедляющее устройство в виде пневматического демпфера или часового (анкерного) механизма. Выдержка времени меняется при регулировании этого устройства. Преимуществом такого реле является возможность питания, как переменным, так и постоянным током, независимость от напряжения и частоты питания, температуры.

При срабатывании электромагнита колодка под воздействием пружины начинает двигаться вниз. Она связана с диафрагмой пневматического замедлителя. Скорость движения колодки определяется сечением отверстия, через которое засасывается воздух в верхнюю полость замедлителя. Выдержка времени регулируется

ется иглой, меняющей сечение этого отверстия. Такое реле позволяет регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 с, с точностью $\pm 10\%$.

В замедлителях в виде анкерного механизма его пружина заводится под воздействием электромагнита. Контакты реле приходят в движение лишь после того, как связанный с ними анкерный механизм отсчитает определенное время уставки.

Выдержка времени у этих реле регулируется в пределах от 7 до 17 с точностью $\pm 10\%$ уставки.

б) моторные реле времени

Для создания выдержки времени 20-30 минут используют так называемые моторные реле времени, в состав которых входит электродвигатель с заданной частотой вращения. Для пуска реле подается напряжение на электромагнит и двигатель. С помощью рычага электромагнит без выдержки времени включает муфту. Через муфту и зубчатую передачу двигатель начинает вращать диски с кулачками, воздействующими на промежуточные кулачки. Выдержка времени регулируется путем изменения начального положения дисков. При снятии напряжения с реле диски поворачиваются в начальное положение с помощью спиральной пружины.

Точность работы реле ± 5 с.

в) реле времени с электромагнитным замедлением

Время срабатывания электромагнита – это время с момента подачи напряжения на обмотку остановки якоря

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}.$$

В большинстве случаев основную часть времени срабатывания составляет время трогания. Поэтому для изменения времени срабатывания воздействуют прежде всего на $t_{\text{тр}}$.

Увеличение активного сопротивления ведет к росту времени трогания, поэтому, чем меньше активное сопротивление, тем быстрее будет срабатывать электромагнит. Для уменьшения сопротивления при неизменной индуктивности необходимо увеличивать сечение обмоточного провода, однако это приводит к увеличению его размеров и мощности рассеивания. Ускорить срабатывание электромагнита при неизменных размерах можно с помощью схем форсировки с использованием конденсаторов. Также можно вызвать ускоренное срабатывание электромагнита с помощью повышения напряжения.

Для создания замедленного действия электромагнита применяется короткозамкнутая обмотка. Такая обмотка может иметь всего один виток в виде медной или алюминиевой гильзы, надеваемой на сердечник электромагнита. При включении питающей обмотки и нарастании создаваемого ею магнитного потока в короткозамкнутой обмотке наводится ЭДС, последняя вызывает ток такого направления, при котором магнитный поток короткозамкнутой обмотки направлен встречно потоку питающей обмотки. Результирующий поток равен разности этих потоков. Скорость нарастания потока в электромагните уменьшается, и время трогания увеличивается.

9 ДАТЧИКИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Датчики представляют собой электрические аппараты, предназначенные для преобразования непрерывного изменения входной (контролируемой) неэлектрической величины в изменение выходной электрической величины.

Основной характеристикой датчика является чувствительность

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X},$$

где ΔY – приращение выходной величины;

ΔX – приращение входной величины.

Часто пользуются понятием относительной чувствительности датчиков

$$S = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X}.$$

Датчики могут быть линейными ($S = \text{const}$) и нелинейными ($S = \text{var}$). У нелинейных датчиков чувствительность зависит от входной величины. Важным параметром является порог чувствительности, представляющий собой наименьшее значение входной величины, которое может быть измерено.

Номинальной характеристикой датчика является зависимость выходной величины от входной. Эта характеристика дается в паспорте датчика и используется как расчетная при измерениях. Экспериментально снятая зависимость может отличаться от номинальной на погрешность.

Абсолютная погрешность

$$\Delta Y = Y_{\text{вх.ном}} - Y_{\text{д}}.$$

Относительная погрешность

$$\gamma_0 = \frac{\Delta Y}{Y_{\text{д}}}.$$

На погрешность оказывают влияние внешние условия эксплуатации: температура, магнитные и электрические поля, влажность окружающей среды, напряжение и частота источника питания, механические и радиационные воздействия и др. Наряду с высокой чувствительностью и малой погрешностью датчики должны обладать необходимым диапазоном изменения входной величины, возможностью согласования с измерительной схемой и минимальным обратным воздействием на входную величину. При быстром изменении входной величины датчик должен быть малоинерционен.

Датчики можно разбить на две большие группы – параметрические (пассивные) и генераторные (активные). К первым относятся резистивные, индуктивные, емкостные и контактные датчики. Ко вторым относятся датчики, использующие эффект наведенной ЭДС (электромагнитной индукции), пьезоэффект, эффект Холла, термо-ЭДС, появление ЭДС при воздействии радиоактивных излучений.

9.1 Контактные датчики

а) резистивные датчики

В таких датчиках подвижный скользящий контакт переменного резистора связан с элементом, перемещение которого контролируется. Если сечение каркаса, на котором намотан резистор всюду одинаково, то сопротивление датчика меняется пропорционально углу поворота или ходу. При необходимости зависимость сопротивления от перемещения может быть выполнена нелинейной. Возможные схемы включения датчиков приведены на рис. 48.

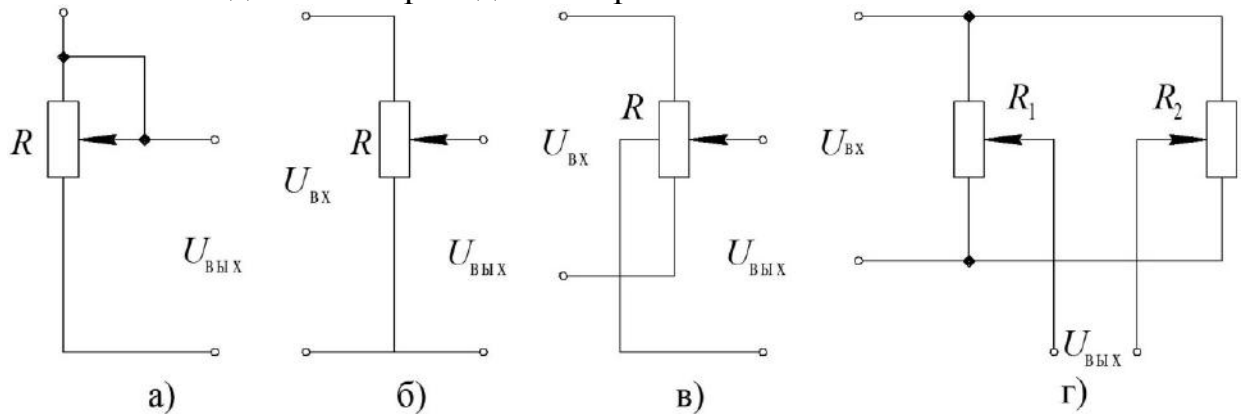


Рис. 48. Схемы включения резистивных датчиков

Наиболее простой является реостатная схема включения (см. рис. 48а). Широкое распространение получила потенциметрическая схема включения (см. рис. 48б). Если входное сопротивление измерительной схемы велико, то выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ зависит от перемещения

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_0}{x_{\text{max}}} x.$$

Чувствительность датчика с линейным перемещением подвижного контакта

$$S = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dx} = \frac{U_0}{x_{\text{max}}}.$$

Для повышения чувствительности желательно увеличивать напряжение питания U_0 . Однако при этом растет мощность, рассеиваемая датчиком. Максимальная чувствительность

$$S_{\text{max}} = \frac{\sqrt{P_{\text{max}} R_0}}{X_{\text{max}}},$$

где P_{max} — наибольшая допустимая мощность резистора.

В схеме на рис. 48в, при перемещении подвижного контакта вниз или вверх от начального среднего положения выходное напряжение меняет полярность.

В схеме на рис. 48г, при перемещении левого подвижного контакта вниз правый, с помощью механической передачи, движется вверх. При этом чувствительность возрастает в 2 раза. Чувствительность резистивных датчиков может быть 3-5 В/мм. Погрешность работы датчиков зависит от стабильности питающего напряжения U_0 , точности изготовления конструктивных деталей, температурной

стабильности использованного материала. С помощью резистивных датчиков можно измерять уровень и расход жидкости, силу (датчик соединяется с пружиной), размеры и т.д.

Преимущества резистивных датчиков: простота конструкции; точность работы до 0,5% малая масса и габариты. Недостатками таких датчиков являются: наличие подвижного контакта, ухудшающего надежность работы и уменьшающего срок службы.

б) контактные релейные датчики

Для контроля размеров и отбраковки негодных деталей широко применяются контактные релейные датчики.

9.2 Бесконтактные датчики

а) индуктивные датчики

Индуктивность обмотки L и протекающий по ней ток I могут изменяться за счет изменения зазора δ или его площади S . Погрешности индуктивности датчиков определяются стабильностью напряжения и частоты источника питания, влиянием температуры на активное сопротивление обмотки и размеры рабочего зазора. Чувствительность индуктивного датчика при изменении зазора

$$S_{\delta} = \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{L_0}{\delta_0 (1 + \Delta \delta / \delta_0)^2},$$

при изменении площади

$$S_{\delta} = \frac{\Delta L}{\Delta S} = \frac{L_0}{S_0},$$

где L_0 – начальное значение индуктивности датчика при $\delta = \delta_0$ и $S = S_0$;

δ_0, S_0 – длина зазора и его площадь в начале хода.

Таким образом, чувствительность S_{δ} является нелинейной функцией $\Delta \delta$. На якорь описанных датчиков действует сила, создающая механическую нагрузку на элемент, перемещение которого контролируется

$$P = P_m \sin^2 \omega t = 2 \frac{B_m^2}{\mu_0} S \sin^2 \omega t.$$

Для устранения недостатка применяются дифференциальные датчики. Такой датчик (рис. 49), содержит две совершенно одинаковые и симметрично расположенные электромагнитные системы.

Токи в обмотках ω_1, ω_2 соответственно равны:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_{\text{н}} + R)^2 + \omega^2 \left(L_{\text{н}} + k \frac{S}{\delta_1} \right)^2}},$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(R_{\text{н}} + R)^2 + \omega^2 \left(L_{\text{н}} + k \frac{S}{\delta - \delta_1} \right)^2}},$$

где k – конструктивный фактор,

R – активное сопротивление обмотки.

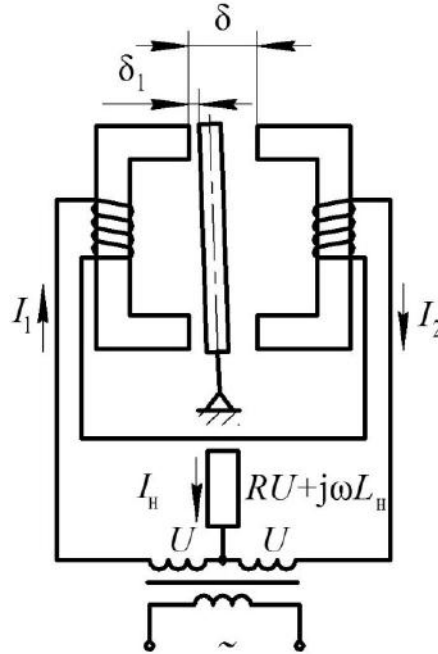


Рис. 49. Дифференциальный датчик

Ток в нагрузке

$$I_{\text{н}} = I_1 - I_2.$$

При увеличении зазора δ_1 ток I_1 в обмотке ω_1 увеличивается, а ток I_2 уменьшается. Зависимость таких датчиков более линейна. Применение дифференциальных датчиков обеспечивает расширение пределов измерений и повышение чувствительности.

б) трансформаторные датчики

В трансформаторном датчике при изменении зазора δ полное сопротивление первичной обмотки также меняется, происходит перераспределение напряжений U_1 и U_2

$$Z_1 = \frac{\omega \mu_0 \omega_1^2 S}{2\delta}$$

Выходное напряжение можно найти из уравнений

$$U = U_1 + U_2;$$

$$U_1 = \frac{UZ_1}{Z_1 + Z_2};$$

$$U_{\text{вых}} = U_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} = k U_1.$$

Зависимость $U_{\text{вых}}(\delta)$ представлена на рис. 50.

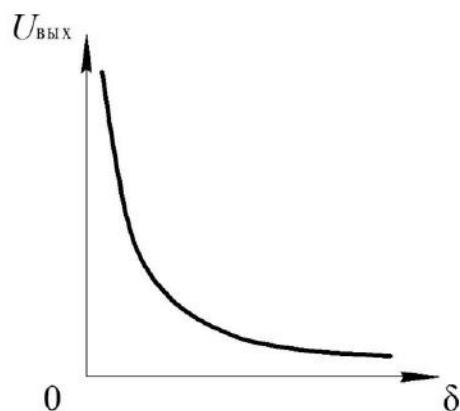


Рис. 50. Зависимость $U_{\text{вых}}(\delta)$

Более совершенная конструкция представлена на рис. 51.

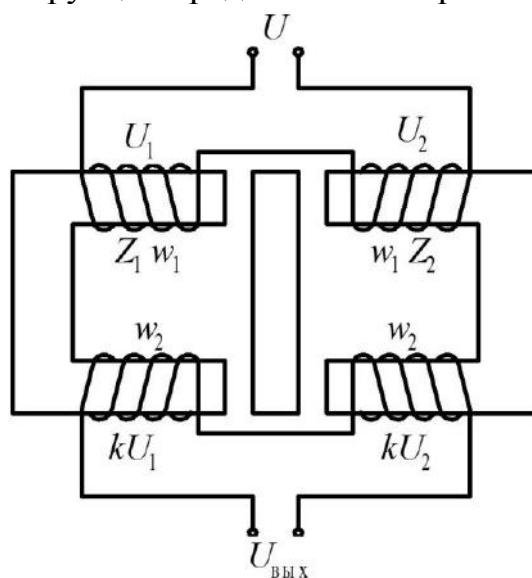


Рис. 51. Трансформаторный датчик

Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = kU \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2}.$$

Таким образом, выходное напряжение прямо пропорционально разности зазоров. При перемещениях применяются датчики с изменяемой площадью (рис. 52).

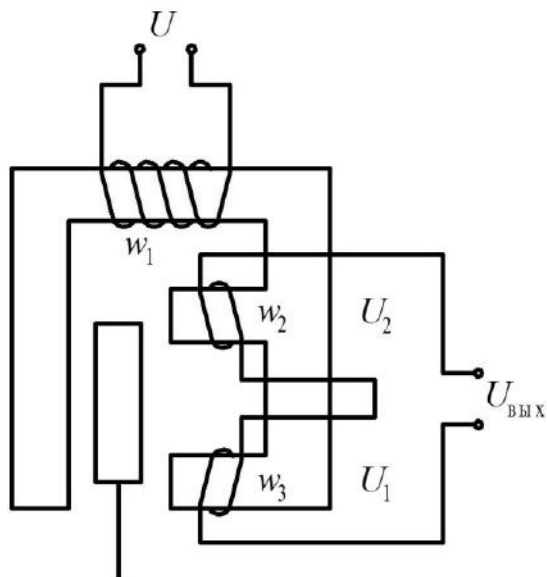


Рис. 52. Трансформаторный датчик с изменяемой площадью зазоров

При угловых перемещениях контролируемого элемента используются датчики с поворотной рамкой (рис. 53).

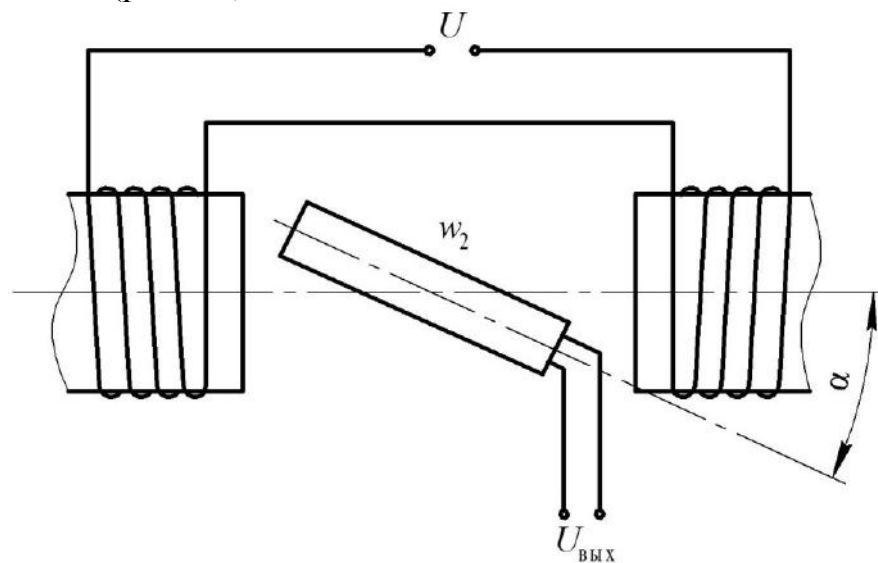


Рис. 53. Трансформаторный датчик с поворотной рамой

Выходное напряжение в таком датчике пропорционально синусу угла поворота

$$U_{\text{вых}} = \omega \omega_p B S_p \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \alpha,$$

где ω_p – число витков обмотки;

B – максимальное значение индукции в рабочем зазоре;

S_p – площадь рамки;

α – угол поворота.

Трансформаторные датчики имеют преимущества перед индуктивными отсутствием гальванической связи между цепью питания и выходной цепью. Относительно большая мощность датчиков (несколько десятков Вт) позволяет применять их без промежуточных усилителей.

в) Магнитоупругие датчики

Если на ферромагнитный материал воздействует механическое усилие, то меняется его магнитная проницаемость μ_a . Это явление, называемое магнитоупругим эффектом, используется в датчиках для измерения статических, знакопеременных и быстро изменяющихся механических нагрузок.

В магнитоупругих датчиках представленных на рис. 54а, б при изменении силы P изменяется магнитная проницаемость магнитопровода и, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки. В датчиках на рис. 54в, г за счет изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность обмоток и, следовательно, выходное напряжение U_2 .

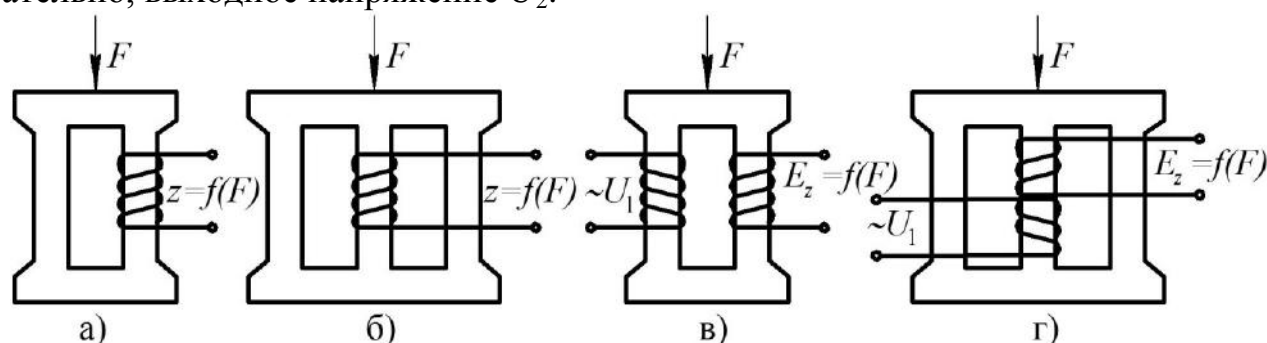


Рис. 54. Магнитоупругие датчики

Относительная чувствительность датчика

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta\mu_a/\mu_a}{\Delta l/l},$$

где $\Delta l/l$ – относительное удлинение (сжатие) магнитопровода по воздействию силы P .

Для увеличения чувствительности желательно, чтобы материалы имели высокую проницаемость и малую индукцию насыщения. Поэтому для таких датчиков широко применяется пермаллой. С целью увеличения чувствительности магнитопровод датчика выполняется без зазора.

Погрешности датчика вызываются колебаниями питающего напряжения (изменяются начальное значение магнитной проводимости и магнитоупругий эффект), температуры (изменяются сопротивление обмотки и магнитоупругий эффект) и магнитоупругим гистерезисом.

Для снижения погрешности от колебаний напряжения устройства с магнитоупругим датчиком должны питаться от стабилизированных источников питания. Для компенсации температурной погрешности в одно плечо моста включается датчик, подвергающийся воздействию контролируемой силы, в другое компенсационный, имеющий точно такие же параметры, но не подвергающийся воздействию. При изменении внешней температуры одинаково изменяются активные сопротивления датчиков. Поскольку эти датчики включены в схему моста, изме-

нение их активного сопротивления не сказывается на работе всего измерительного канала.

Погрешности за счет магнитоупругого гистерезиса могут достигать 4% и вызваны тем, что одному и тому же значению воздействующей силы соответствует различное значение магнитной проницаемости. Для уменьшения этой погрешности выбирается материал с узкой петлей гистерезиса. Напряженность магнитного поля должна приближаться к напряженности насыщения. Максимальная механическая нагрузка не должна превышать 1/6-1/7 предела упругости.

г) индукционные датчики

Если изменяется потокосцепление, связанное с проводником или катушкой, то в них возникает ЭДС. Это происходит при движении проводника в магнитном поле или магнитного поля, пересекающего неподвижный проводник. ЭДС индукции возникает и когда потокосцепление изменяется в результате изменения магнитной проницаемости. Эти явления лежат в основе индукционных датчиков (рис. 55).

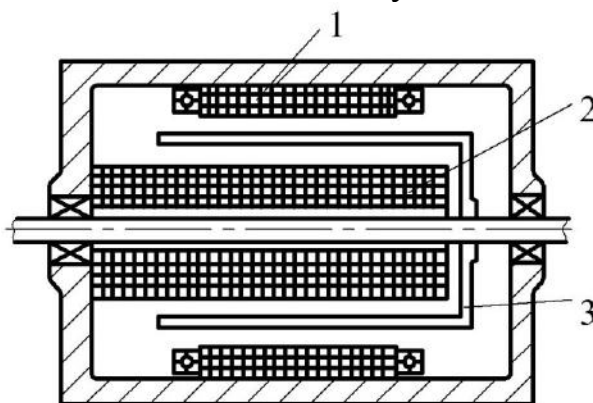


Рис. 55. Индукционный датчик

Индукционные датчики часто используются как датчики скорости. Если использовать дифференцирующие и интегрирующие цепочки, то можно получить выходные величины пропорциональные перемещению и ускорению. Выходной сигнал снимается с обмотки 2, в которой наводится ЭДС

$$E = Bl\omega v,$$

где B – индукция создаваемая в рабочем зазоре кольцевым постоянным магнитом 3;

l – длина витка перемещающейся обмотки;

ω – число витков;

v – скорость перемещения измерительной обмотки.

Чувствительность датчика $S = Bl\omega$ может быть увеличена за счет увеличения индукции и числа витков.

10 МУФТЫ

Для регулирования частоты вращения, вращающего момента на валу, для соединения и разъединения ведущего и ведомого вала применяются электрические аппараты в виде муфт с электрическим управлением. Эти муфты можно подразделить на индукционные и электромагнитные.

10.1 Индукционные муфты

Индукционные муфты по принципу действия аналогичны асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором. Приводной двигатель (рис. 56), соединяется со сплошным якорем 1, ведомый вал связан с индуктором 2, катушка возбуждения 4 создает постоянный магнитный поток 5, замыкающийся по якорю 1. При вращении якоря магнитное поле катушки индуктора пересекает цилиндрическое тело якоря, и в нем наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создает силу, действующую в направлении вращения якоря. Материал якоря должен обладать малым удельным электрическим сопротивлением, что обеспечивает возникновение достаточно больших вихревых токов, и высокой магнитной проницаемостью для получения возможно больших значений магнитного потока. Регулируя ток возбуждения I_B (рис. 57), и тем самым, изменяя магнитное поле, можно плавно регулировать в широких пределах частоту вращения и передаваемый вращающий момент ведомого вала.

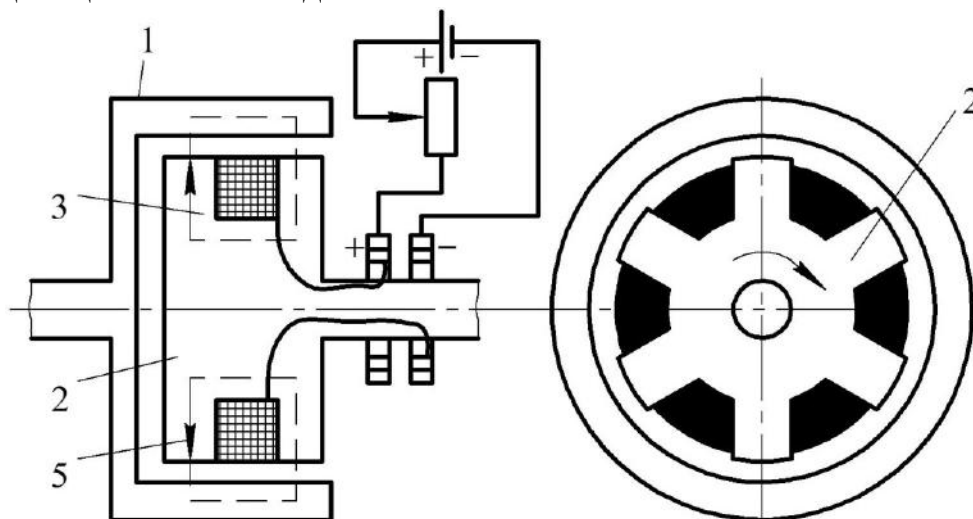


Рис. 56. Индукционная муфта

Ток возбуждения в относительных единицах

$$I_B^* = \frac{I_B}{I_{\text{вном}}}.$$

Передаваемый момент в относительных единицах

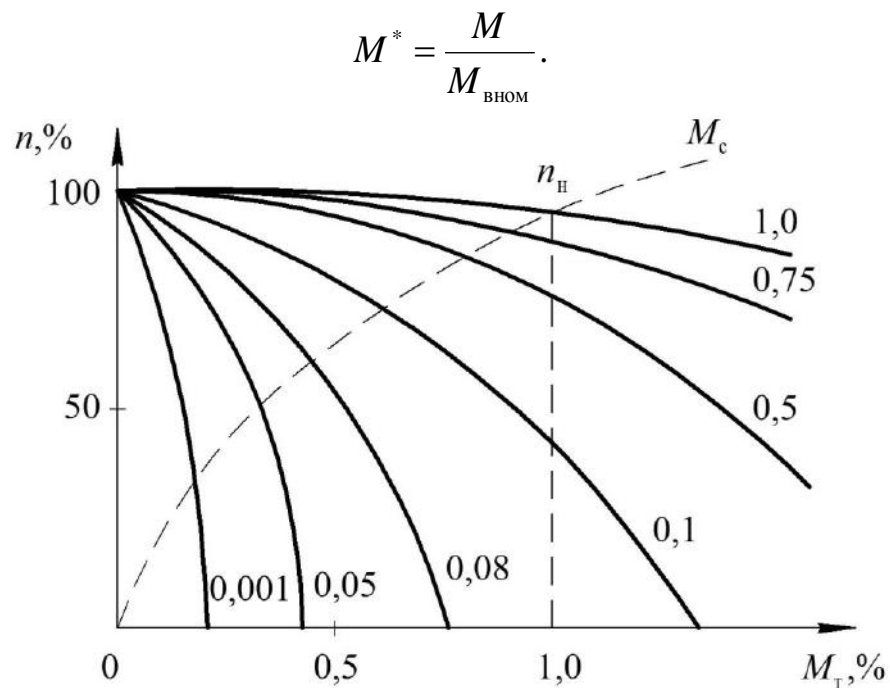


Рис. 57. Механические характеристики индукционной муфты

При увеличении момента нагрузки угловая скорость вала уменьшается. При этом возрастают скольжение и токи, наводимые в якоре муфты. Увеличение токов в якоре увеличивает момент, развиваемый муфтой, и передаваемый на вал.

10.2 Электромагнитные муфты

Более широко применяются электромагнитные муфты, в которых используется электромагнитное усилие притяжения между ферромагнитными телами.

а) электромагнитные фрикционные муфты

Электромагнитная фрикционная муфта (рис. 58), состоит из корпуса 2, электромагнита, жестко закрепленного на ведущем валу 1, а якорь 5 расположен на скользящей шпонке на ведомом валу 7. Между корпусом и якорем помещена фрикционная прокладка 3.

В корпусе находится катушка 4. Если через эту катушку пропустить ток, то в корпусе возникает магнитный поток, пронизывающий фрикционную прокладку и замыкающийся якорем. Якорь оказывается притянутым к корпусу, и движение ведущего вала 1 через корпус и якорь будет передано ведущему валу 7. По прекращении подачи тока в катушку пружина 6 отталкивает якорь от корпуса и движение ведомого вала прекращается.

При большом передаваемом моменте для уменьшения габаритных размеров муфты применяется многодисковая система.

Временем включения муфты называется промежуток времени от момента подачи напряжения на электромагнит до достижения вращающим моментом 0,9 установившегося значения.

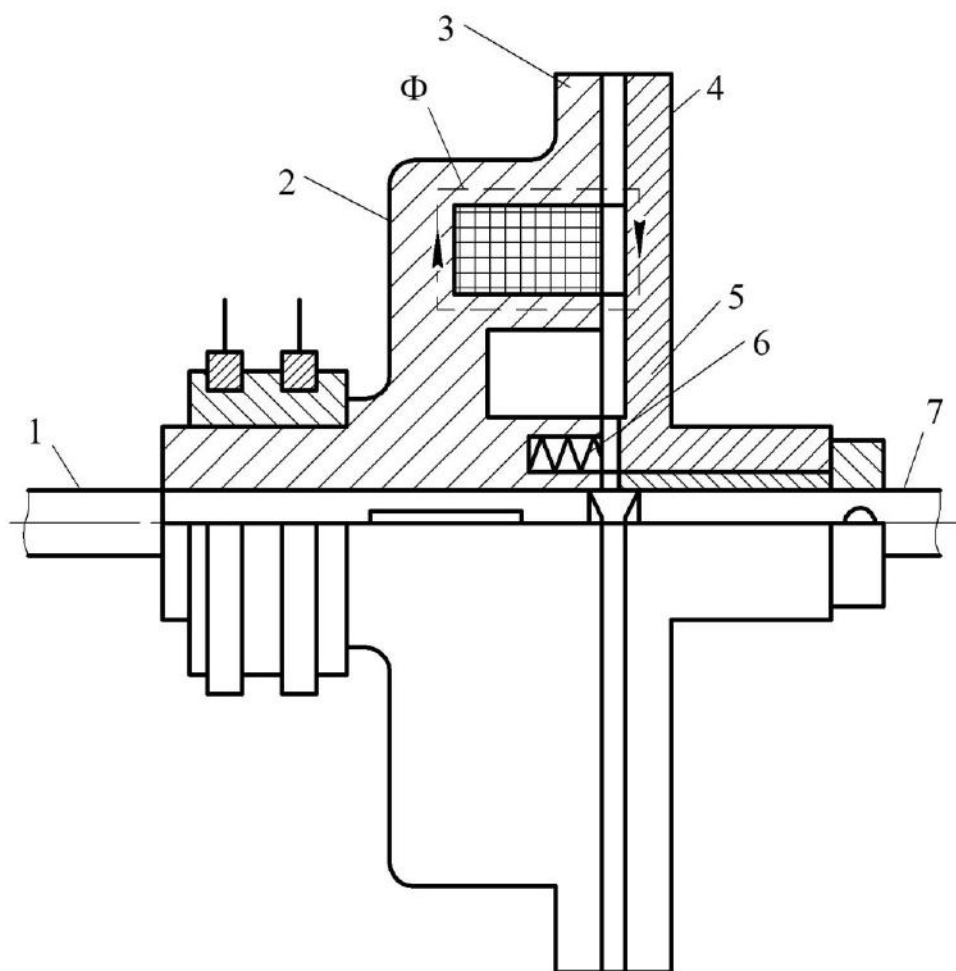


Рис. 58. Электромагнитная фрикционная муфта

Время включения возрастает с увеличением габаритов муфты, постоянной времени электромагнита, хода якоря, числа дисков и обычно находится в пределах от 0,07 до 0,3 с.

Время отключения представляет собой промежуток времени от обесточивания электромагнита до спада вращающего момента до 0,05 номинального значения. Это время увеличивается с ростом габаритных размеров муфты, магнитного потока и колеблется от 0,1 до 0,4 с.

б) электромагнитные ферропорошковые муфты

В ферропорошковой муфте барабанного типа (рис. 59), ведущий вал 1 через немагнитные фланцы 2 соединен с ферромагнитным цилиндром (барабаном 3). Внутри цилиндра располагается электромагнит 4, связанный с ведомым валом 6. Обмотка 5 электромагнита питается через контактные кольца. Внутренняя полость 7 заполнена ферромагнитным порошком (чистое или карбонильное железо) с зернами размером от 4-6 до 20-50 мкм, смешанным с сухим (тальк, графит) или жидким (трансформаторное, кремнийорганическое масло) наполнителем. При обесточенной обмотке и вращении ведущей части (барабана) электромагнит и ведомый вал остаются неподвижными, поскольку ферромагнитные зерна наполнителя свободно перемещаются относительно друг друга. Определенное трение между барабаном и электромагнитом существует, но оно относительно невелико.

При подаче напряжения на электромагнит зерна ферромагнитного порошка теряют свободу перемещения под воздействием магнитного поля обмотки. Вязкость среды, находящейся в барабане, резко возрастает. Увеличивается сила трения между барабаном и электромагнитом. На ведомом валу появляется вращающий момент.

При определенном значении тока возбуждении ферромагнитный порошок и наполнитель полностью затвердевают. Барабан и электромагнит становятся жестко связанными. Можно рассматривать передаваемый момент как момент от силы трения, действующей между порошком и внутренней цилиндрической поверхностью барабана.

По сравнению с электромагнитными муфтами трения, ферропорошковые муфты имеют значительно большее быстродействие (примерно в 10 раз) благодаря отсутствию якоря. Большим преимуществом ферропорошковой муфты является отсутствие быстроизнашиваемых дисков трения.

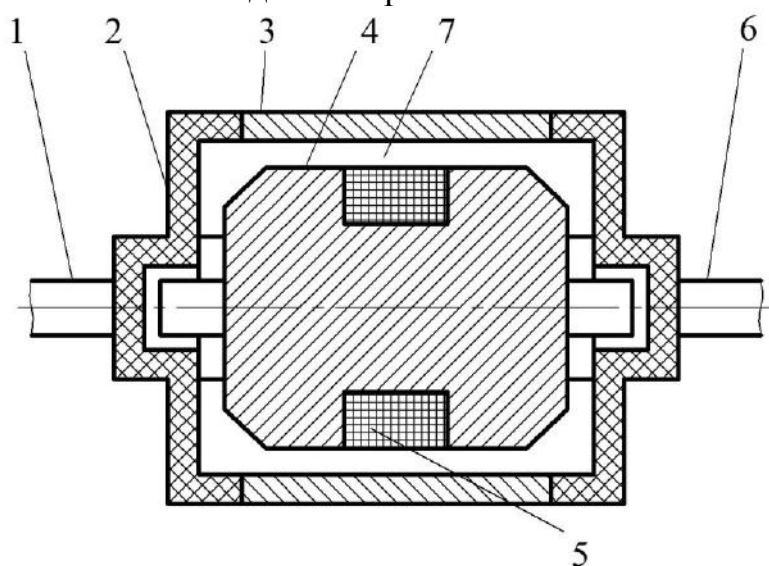


Рис. 59. Электромагнитная ферропорошковая муфта

Ферропорошковые муфты целесообразно применять там, где требуются высокое быстродействие, большая частота включения и плавное регулирование скорости ведомого вала.

Недостатком ферропорошковых муфт является меньшая передаваемая мощность при одинаковых габаритных размерах с муфтой трения.

в) гистерезисные муфты

Возможны два варианта исполнения таких муфт: в первом – магнитное поле индуктора создается обмоткой, во втором – постоянными магнитами. Недостатком первого варианта является наличие контактной системы для передачи тока в индуктор, достоинством – возможность электрического управления муфтой. Муфты с постоянными магнитами (магнитогистерезисные) обладают высокой надежностью. Однако регулирование передаваемого момента в них затруднено.

В магнитогистерезисной муфте (рис. 60), постоянные магниты 1 с полюсными наконечниками 2 укреплены в магнитопроводе 3 индуктора, связанного с веду-

щим валом. На ось ведомого вала насажен ротор, состоящий из втулки 5 из немагнитного или магнитомягкого материала и колец 4 активного слоя. Кольца активного слоя изготовлены из материала с довольно широкой петлей гистерезиса, имеющей высокие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы.

Пусть ротор заторможен, а индуктор вращается приводным двигателем с угловой скоростью ω_1 . Под действием вращающегося магнитного поля индуктора в активном слое появляются потери на гистерезис от перемагничивания. Потери за один цикл перемагничивания определяются максимальным значением индукции в активном слое ротора.

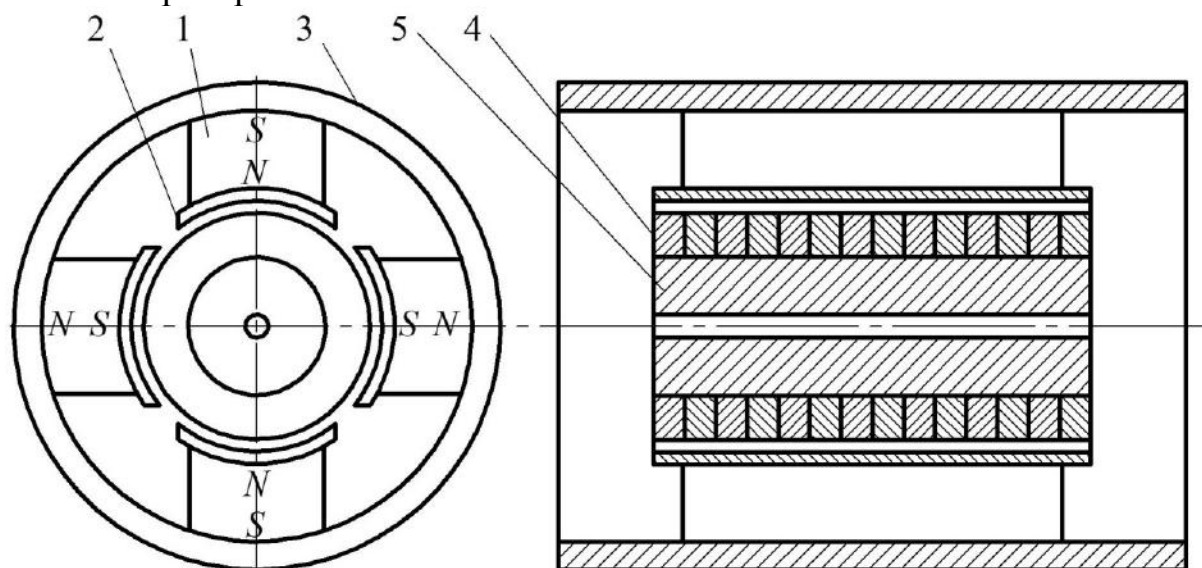


Рис. 60. Гистерезисная муфта

Взаимодействие поля постоянных магнитов индуктора с полем, созданным активным слоем, создает на роторе гистерезисный момент. Если ведомый вал не заторможен, то под воздействием этого момента ротор начинает вращаться в направлении вращения индуктора со скоростью ω_2 .

Момент, передаваемый муфтой на ведомый вал

$$M_r = \frac{p_r f_1 V_r}{2\pi n_1},$$

где p_r – удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания;

f_1 – частота перемагничивания активного слоя;

$$f_1 = \frac{p\omega_1}{2\pi},$$

p – число пар полюсов;

ω_1 – частота вращения ведущего вала;

V_r – объем активного слоя;

n_1 – скорость вращения ведущего вала.

Таким образом, момент на ведомом валу не зависит от частоты его вращения. Преимущество гистерезисной муфты заключается в постоянстве передаваемого момента.

В ряде схем автоматики необходима быстрая остановка привода. В этих случаях применяются тормоза на базе гистерезисной электромагнитной муфты. Ведомая часть муфты делается неподвижной, а ведущая соединяется с приводным двигателем. При торможении двигатель отключается и включается муфта. Постоянный тормозной момент муфты обеспечивает быструю остановку привода.

11 АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Автоматические воздушные выключатели служат для автоматического отключения электрической цепи при перегрузках, КЗ, чрезмерном понижении напряжения питания, изменения направления мощности и т.д., а также для редких включений и отключений вручную номинальных токов нагрузки.

К автоматам применяются следующие требования:

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

2. Автомат должен обеспечивать многократное отключение предельных токов КЗ, которые могут достигать сотен кА. После отключения этих токов автомат должен быть пригоден для длительного пропускания номинального тока.

3. Для обеспечения электродинамической и термической стойкости энергоустановок, уменьшения разрушений и других последствий, вызываемых токами КЗ, автоматы должны иметь малое время отключения. С целью уменьшения габаритных размеров и повышения безопасности обслуживания необходима минимальная зона выхлопа нагретых и ионизированных газов в процессе гашения дуги.

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

В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся:

- 1) максимальные автоматы по току;
- 2) минимальные автоматы по току;
- 3) минимальные автоматы по напряжению;
- 4) автоматы обратного тока;
- 5) максимальные автоматы, работающие по производной тока;
- 6) поляризованные автоматы (отключающие цепь при нарастании тока в одном – прямом направлении);
- 7) неполяризованные автоматы (реагируют на возрастание тока в любом направлении). В некоторых случаях требуется комбинированная защита – максимальная по току и минимальная по напряжению. Автоматы, удовлетворяющие этим условиям, называются универсальными.

В любом автомате есть следующие основные узлы: токоведущая система, дугогасительная система, привод автомата, механизм автомата, механизм свободного расцепления и элементы защиты – расцепители.

Токоведущая цепь. Наиболее важной частью токоведущей цепи автоматов являются контакты. При номинальных токах до 200 А применяется одна пара контактов, которые для увеличения дугостойкости могут быть облицованы металло-керамикой. При токах более 200А применяются двухступенчатые контакты.

Дугогасительная система. В автоматах применяются полужакрытое и открытое исполнения дугогасительных устройств. В полужакрытом исполнении автомат закрыт изоляционным кожухом, имеющим отверстия для выхода горячих газов. Объем кожуха достаточно велик для исключения внутри больших избыточных давлений. Зона выброса горячих ионизированных газов составляет несколько сантиметров от выхлопных щелей. Такое исполнение применяется в установочных и универсальных автоматах, монтируемых рядом с другими аппаратами. Предельный отключаемый ток – не более 50 кА.

В быстродействующих автоматах и автоматах на большие токи применяются дугогасительные устройства открытого исполнения с большой зоной выброса. В установочных и универсальных автоматах массового применения широко используется деионная дугогасительная решетка из стальных пластин. На каждую пару пластин приходится напряжение 25В. Такие устройства обеспечивают гашение дуги с током до 50кА при 660В, или 55кА при 440В.

При больших токах применяются лабиринтно-щелевые камеры с прямой продольной щелью. Втягивание дуги в щель осуществляется магнитным дутьем. Продольно-щелевая камера может иметь несколько параллельных щелей неизменного сечения. Это уменьшает аэродинамическое сопротивление камеры и облегчает вхождение в нее дуги с большим током. В начале дуга разбивается по щелям на ряд параллельных дуг. Но затем из всех параллельных дуг остается одна. Гашение этой дуги завершает процесс гашения.

В лабиринтно-щелевой камере постепенное вхождение дуги в зигзагообразную щель не создает высокого аэродинамического сопротивления при больших токах. Зигзагообразная щель уменьшает габаритные размеры автомата. В такой камере дуга интенсивно охлаждается стенками. Для того чтобы камера не разрушалась под воздействием температуры, дуга должна двигаться непрерывно с большой скоростью. Это требует создания мощного магнитного поля на всем пути движения дуги в щели.

Приводы. Приводы автоматов могут быть ручные и электромеханические. Ручные приводы применяются при номинальных токах до 200. При токах до 1 кА применяются электромагнитные приводы. Недостатками электромагнитного привода являются большие скорости движения и удары в механизме, которые могут приводить к вибрации контактов.

Обычно электромагнитный привод автомата питается от той же сети, что и нагрузка. Напряжение на приводе в момент включения на существующее КЗ падает до нуля, и автомат может не включиться.

При токах 1,5 кА и выше желательно применять электродвигательные приводы. Электродвигатель связан с автоматом через понижающую зубчатую передачу.

Расцепители автоматов. Отключение автоматов происходит под действием на механизм свободного расцепления элементов защиты – расцепителей. Наиболее распространены максимальные расцепители.

В максимальных расцепителях широко используются электромагнитные системы и тепловые реле с биметаллической пластиной.

Тепловые расцепители имеют следующие недостатки:

1) Слабая термическая стойкость требует высокого быстродействия при отключении больших токов. Обычно применяется комбинация из электромагнитного и теплового расцепителей. Электромагнитный расцепитель работает при КЗ, тепловой – при перегрузках.

2) С ростом отключаемого тока растет усилие, необходимое для расцепления автомата. Поэтому такие расцепители применяются для отключения при токах до 200 А.

3) Выдержка времени зависит от температуры окружающей среды.

4) Разброс в токе срабатывания у тепловых расцепителей примерно в 2 раза больше чем у электромагнитных.

Минимальные расцепители выполняются также электромагнитного типа. Напряжение отпускания электромагнита регулируется в пределах 35-70% номинального. При напряжении, меньшем напряжения уставки, пружина отрывает якорь и воздействует на механизм свободного расцепления. Минимальный расцепитель может служить для дистанционного отключения, если последовательно с ним включить кнопку с размыкающим контактом.

Быстродействие автоматов. Быстродействие автомата может быть повышено за счет сокращения собственного времени срабатывания и времени гашения дуги. Последнее ограничивается уровнем перенапряжения. Чем быстрее уменьшается ток, тем выше перенапряжение.

Для уменьшения собственного времени отключения необходимо максимально сократить время от момента достижения током значения срабатывания до момента расхождения контактов. Для этого стремятся либо непосредственно связать якорь электромагнита с контактом, либо максимально упростить эти связи.

Условия выбора автоматов:

1) $U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{ном.с}};$

2) $I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{ном.с}};$

3) Для автоматов для защиты двигателей с КЗ ротором

$$I_{\text{уст.эм}} \geq (1,5 - 1,8)I_n,$$

для автоматов для защиты двигателей с фазным ротором

$$I_{\text{уст.эм}} \geq (2,5 - 3)I_n.$$

Для группы КЗ двигателей

$$I_{\text{устэм}} \geq (1,5 - 1,8) \left[\sum I_{\text{ном.дв}} + (I_n - I_{\text{ном.дв}}) \right]$$

где $(I_n - I_{\text{ном.дв}})$ – берется для двигателей, у которых она наибольшая.

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.

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

$$I_{ном.расц} \geq 1,5I_{ном.дв}.$$

5) Проверка по току КЗ

Для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$\frac{I_k}{I_{уст.эм}} \geq 1,25 - 1,4.$$

Для автоматов с комбинированным расцепителем

$$\frac{I_k}{I_{уст.эм}} \geq 3.$$

6) Предельный ток отключения должен быть больше тока КЗ

$$I_{отк.авт} \geq I_k.$$

Библиографический список

1. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс [Текст]: учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов / А.А. Чунихин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 648 с.: ил.
2. Блок В.М. Пособие к курсовому и дипломному проектированию [Текст]: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В.М. Блок. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 383 с.: ил.
3. Фёдоров А.А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию [Текст]: в 2 т. / Под общ. ред. А.А. Фёдорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.: ил.
4. Электротехнический справочник [Текст]: в 4 т. т1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 1995. – 520 с.: ил.
5. Электротехнический справочник [Текст]: в 4 т. т2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 518 с.: ил.
6. Электротехнический справочник [Текст]: в 4 т. т3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 964 с.: ил.
7. Электротехнический справочник [Текст]: в 4 т. т4. Использование электрической энергии / под общ. ред. Профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 696 с.: ил.
8. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание [Текст]: Все действующие разделы ПУЭ-7. – Новосибирск.: Сиб. унив. изд-во, 2008. – 511 с.: ил.