Подписан: Шолохов Александр Константинович
DN: ИНН=507271415100, СНИЛС=11099402232, E=latav@mail.ru, C=RU, S=Московская область, O="ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ "ЛУХОВИЦКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИКУМ"", G=Александр Константинович, SN=Шолохов, CN=Шолохов Александр Константинович
Дата: 2021.04.22 15:21:14+03'00'

Введение

Электрические аппараты (ЭА) **–** это электротехнические устройства, применяемые при использовании электрической энергии, начиная от ее производства, передачи, распределения и кончая потреблением. Разнообразие видов ЭА и различие традиций мировых электротехнических школ затрудняют их классификацию.

В настоящее время *под ЭА понимают электротехнические устройства управления потоком энергии и информации.* При этом речь может идти о потоках энергии различного вида: электрической, механической, тепловой и др. Например, потоком механической энергии от двигателя к технологической машине может управлять электромагнитная муфта. Потоками тепловой энергии можно управлять при помощи электромагнитных клапанов и заслонок. Таких примеров использования ЭА можно привести большое количество. Примером использования ЭА для управления информацией является применение реле в телефонии. Например, при создании телеграфного аппарата П.Л. Шиллинг в 1820г. применил впервые электромагнитное реле. Простейшая формально-логическая обработка дискретной информации также была реализована на реле.

Однако наибольшее распространение получили ЭА для управления потоками электрической энергии для изменения режимов работы, регулирования параметров, контроля и защиты электротехнических систем и их составных частей. Как правило, функции таких ЭА осуществляются посредством коммутации (включения и отключения) электрических цепей с различной частотой, начиная от относительно редких, нерегулярных значений до периодических высокочастотных, например, в импульсных регуляторах напряжения.

Одним из основных признаков классификации ЭА является напряжение. Различают аппараты низкого напряжения (АНН) – до 1000 В и аппараты высокого напряжения (АВН) – свыше 1000 В.

Большинство *аппаратов низкого напряжения* условно можно разделить на следующие основные виды:

аппараты управления и защиты – автоматические выключатели, контакторы, реле, пускатели электродвигателей, переключатели, рубильники, предохранители, кнопки управления и другие аппараты, управляющие режимом работы оборудования и его защитой;

аппараты автоматического регулирования – стабилизаторы и регуляторы напряжения, тока, мощности и других параметров электрической энергии;

аппараты автоматики – реле, датчики, усилители, преобразователи и другие аппараты, осуществляющие функции контроля, усиления и преобразования электрических сигналов.

Следует отметить, что АНН иногда классифицируют по величине коммутируемого тока: слаботочные *(слаботоковые)* – до 10 А и сильноточные *(сильнотоковые)* – свыше 10 А. При этом нижние пределы надёжно коммутируемых современными электрическими аппаратами токов достигают 10^{-9} А, а напряжений - 10^{-5} В.

Аппараты высокого напряжения работают в сетях с напряжением до 1150 кВ переменного тока и 750 кВ постоянного тока и также существенно различаются по своим функциям. В настоящем учебном пособии аппараты высоко напряжения не рассматриваются.

Электрические аппараты как низкого, так и высокого напряжения обычно являются конструктивно законченными техническими устройствами, реализующими определенные функции и рассчитанными на разные условия эксплуатации.

В основе большинства *электромеханических ЭА* лежит контактная система с различными типами приводов - ручным, электромагнитным, механическим и др. Процессы, протекающие в ЭА, определяются различными и многообразными физическими явлениями, которые изучаются в электродинамике, механике, термодинамике и других фундаментальных науках.

Одной их наиболее сложных задач, решаемых при разработке электромеханического электронного аппарата, является обеспечение работоспособности электрических контактов, в том числе и при гашении электрической дуги, возникающей при выключении ЭА.

По принципу работы электрические аппараты подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. Первые имеют подвижные контактные части, и воздействие на управляемую цепь осуществляется путем замыкания или размыкания этих контактов. Бесконтактные аппараты не имеют коммутирующих контактов. Эти аппараты осуществляют управление путем изменения своих электрических параметров (индуктивности, ёмкости, сопротивления и т.д.).

Контактные аппараты могут быть *автоматическими* и *неавтоматическими*. Автоматические – это аппараты, приходящие в действие от заданного режима работы цепи или машины. Неавтоматические – это аппараты, действие которых зависит только от оператора. Они могут управляться дистанционно или непосредственно.

Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам, чрезвычайно разнообразны и зависят от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата. Кроме специфических требований, относящихся к данному аппарату, все электрические аппараты должны удовлетворять некоторым общим требованиям:

1. Каждый электрический аппарат при работе обтекается рабочим током, при этом в токоведущих частях выделяется определенное количество теплоты и аппарат нагревается. Температура не должна превосходить некоторого определенного значения, устанавливаемого для данного аппарата и его деталей.

2. В каждой электрической цепи может быть ненормальный (перегрузка) или аварийный (короткое замыкание) режим работы. Ток, протекающий по аппарату в этих режимах, существенно (в 50 и более раз) превышает номинальный, или рабочий, ток. Аппарат подвергается в течение определенного времени чрезмерно большим термическим и электродинамическим воздействиям тока, однако он должен выдерживать эти воздействия без каких-либо деформаций, препятствующих дальнейшей его работе.

3. Каждый электрический аппарат работает в цепи с определенным напряжением, где возможны также и перенапряжения. Однако электрическая изоляция аппарата должна обеспечивать надежную работу аппарата при заданных значениях перенапряжений.

4. Контакты аппаратов должны быть способны включать и отключать все токи рабочих режимов, а многие аппараты – также и токи аварийных режимов, которые могут возникнуть в управляемых и защищаемых цепях.

5. К каждому электрическому аппарату предъявляются требования по надежности и точности работы, а также по быстродействию.

6. Любой электрический аппарат должен, по возможности, иметь наименьшие габариты, массу и стоимость, быть простым по устройству, удобным в обслуживании и технологичным в производстве.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АППАРАТАХ

Рассмотрены основные тепловые процессы, протекающие в электрических аппаратах. Режимы работы электрических аппаратов. Нагрев и охлаждение аппаратов. Термическая стойкость. Измерение температуры нагрева.

Цель занятия – рассмотреть особенность тепловых процессов происходящих в электрических аппаратах; изучить режимы работы аппаратов, способы нагрева и охлаждения.

После изучения темы необходимо знать

1. Физическую сущность явления передачи тепла
2. Уравнение теплового баланса
3. Тепловые режимы работы аппаратов
4. Способы измерения температуры нагрева элементов аппаратов
5. Термическую стойкость аппаратов
6. Нагрев аппаратов
7. Способы охлаждения аппаратов

1.Тепловые процессы в электрических аппаратах

Электрические аппараты являются сложными электротехническими устройствами, содержащими много элементов, одни из которых являются проводниками электрических токов, другие - проводниками магнитных потоков, а третьи служат для электрической изоляции. Часть элементов может перемещаться в пространстве, передавая усилия другим узлам и блокам. Работа большой части аппаратов связана с преобразованием одних видов энергии в другие. При этом, как известно, неизбежны потери энергии и превращение ее в тепло. Тепловая энергия частично расходуется на повышение температуры аппарата и частично отдается в окружающую среду.

При увеличении температуры происходит ускоренное старение изоляции проводников и уменьшение их механической прочности. Так, например, при возрастании длительной температуры всего лишь на 8 °С сверх допустимой для данного класса изоляции, срок службы последней сокращается в 2 раза.

При увеличении температуры меди со 100 до 250 °С механическая прочность снижается на 40 %. Следует иметь в виду, что при коротком замыкании, когда температура может достигать предельных значений (200-300 °С), токоведущие части подвержены воздействию больших электродинамических сил. Работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

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

2.Источники теплоты в электрических аппаратах

При протекании тока по электрическому проводнику в нём выделяется мощность P, которая для однородного проводника с равномерной плотностью постоянного тока I в единицу времени определяется как

$$P = I^2 R$$

где R – активное электрическое сопротивление проводника длиной l и поперечным сечением S

$$R = \frac{\rho\, l}{S}.$$

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

$$\rho = \rho_o (1 + \alpha T),$$

где ρ_o – удельное сопротивление при температуре 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

Как известно из курса теоретических основ электротехники (ТОЭ), *поверхностным эффектом* называется явление неравномерного распределения плотности переменного тока по поперечному сечению одиночного проводника, а *эффектом близости* – явление неравномерного распределения плотности переменного тока, обусловленное влиянием друг на друга близко расположенных проводников с токами.

Неравномерность распределения плотности тока приводит к возникновению дополнительных потерь мощности. При этом следует учитывать, что в проводниках из ферромагнитных материалов вышеуказанные явления проявляются значительно сильнее, чем в немагнитных проводниках.

В ферромагнитных нетоковедущих частях электрического аппарата, находящихся в переменном магнитном поле, также имеют место источники теплоты. Это обусловлено вихревыми токами, возникающими тогда, когда переменный во времени магнитный поток пронизывает ферромагнитные части аппарата.

Если магнитопровод выполнен из листовой электротехнической стали (шихтованный магнитопровод), то потери мощности в нём существенно меньше, чем в сплошном стальном магнитопроводе.

В электромеханических аппаратах, предназначенных для коммутации электрических цепей, мощным источником теплоты является электрическая дуга. В электромагнитных муфтах, предназначенных для коммутации и передачи механической мощности, потери на трение составляют существенную долю от общих потерь мощности.

3.Анализ способов распространения теплоты в электрических аппаратах

Передача теплоты всегда идёт от более нагретых тел к менее нагретым и происходит до тех пор, пока температура тел не сравняется. Чем выше температура нагретого тела, тем интенсивнее будет происходить передача тепла. Различают три способа распространения теплоты в пространстве: теплопроводностью, тепловым излучением и конвекцией.

Теплопроводность – распространение тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частиц или тел, имеющих разную температуру. Теплопроводящие свойства среды характеризуются *коэффициентом теплопроводности*.

Тепловое излучение – распространение внутренней энергии тела путём излучения электромагнитных волн. Совокупность процессов взаимного излучения, поглощения, отражения и пропускания энергии в системе различных тел называется теплообменом излучением. Процесс осуществляется электромагнитными колебаниями с различной длиной волны. В наибольшей степени переносят тепловую энергию инфракрасные лучи (длина волны 0,8 – 40 мкм), в меньшей степени – световые лучи (длина волны 0,4 – 0,8 мкм).

Конвекция – распространение теплоты при перемещении объёмов жидкостей или газов в пространстве из областей с одной температурой в области с другой температурой.

Различают *естественную* и *вынужденную (искусственную)* конвекцию. При вынужденной конвекции жидкость или газ движутся за счёт внешних сил (под действием насоса, вентилятора и т.п.). При естественной конвекции движение происходит за счёт выталкивающих (Архимедовых) сил, возникающих из-за различных плотностей холодных и горячих частиц жидкости или газа.

Коэффициент теплопередачи конвекцией определяет количество теплоты, которая отдаётся в секунду с 1 м^2 нагретой поверхности при разности температур поверхности и охлаждающей среды 1 °С. Он зависит от многих факторов, главные из которых – скорость движения и теплоёмкость охлаждающей среды, температура поверхности и среды, геометрические размеры и форма нагретой поверхности.

4.Режимы работы электрических аппаратов

При эксплуатации электрических аппаратов могут иметь место следующие режимы работы:

- продолжительный – при котором температура аппарата достигает установившегося значения и аппарат при этой температуре остаётся под нагрузкой сколь угодно длительное время;
- прерывисто-продолжительный – при котором аппарат остаётся под нагрузкой при установившемся значении температуры ограниченное техническими условиями (ТУ) время;
- повторно-кратковременный – при котором температура частей электрического аппарата за время нагрузки не достигает установившегося значения, а за время паузы не уменьшается до температуры окружающей среды;

- кратковременный – при котором в период нагрузки температура частей электрического аппарата не достигает установившегося значения, а в период отсутствия нагрузки достигает температуры холодного состояния;
- короткого замыкания – это частный случай кратковременного режима работы, когда температура частей электрического аппарата значительно превосходит установившуюся температуру при нормальном режиме работы.

5.Продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и перемежающийся режимы работы электрических аппаратов

Обычно электрические аппараты могут работать в одном из следующих режимов, для которых характерно определённое изменение во времени t тока нагрузки $I_н$ и превышение температуры нагрева τ (разность между температурой аппарата и температурой окружающей среды): продолжительном, кратковременном, повторно-кратковременном и перемежающемся.

В *продолжительном режиме* (рис. 1.1.) достигается установившееся превышение температуры нагрева $\tau_м$, значение которого в любом случае должно быть меньше, чем допустимое превышение температуры $\tau_о$. Скорость изменения температуры характеризуется *тепловой постоянной времени* $\vartheta_о$. Касательная к кривой $\tau = f(t)$ отсекает на линии установившейся температуры как раз отрезок, равный по длительности $\vartheta_о$.

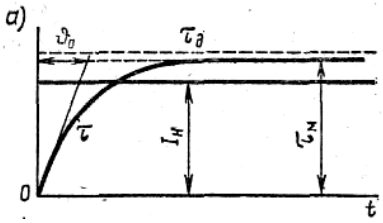
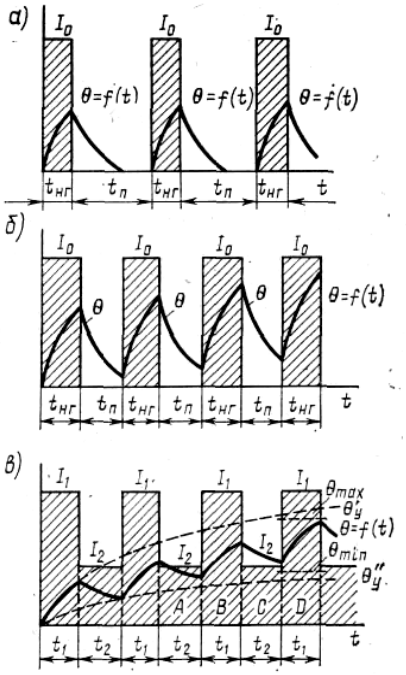


Рис. 1.1. Продолжительный режим работы

В *кратковременном режиме* (рис. 1.2, *а*) в период наличия тока $I_о$ температура аппарата не успевает достичь установившегося значения, а за время паузы тока $t_П$ температура аппарата снижается практически до температуры окружающей среды $T_{окр}$. Это позволяет осуществлять форсирование аппарата по току с тем условием,



что за время нагрузки $t_{НГ}$ не будет достигнуто τ_o.

Рис. 1.2. Режимы работы аппаратов

В *повторно-кратковременном режиме* (рис 1.2, *б*) температура аппарата так же не достигает установившегося значения в период $t_{НГ}$, а во время паузы тока не успевает снизиться до $T_{окр}$. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_{НГ}}{t_{НГ} + t_П} \times 100\%,$$

где $t_{НГ}$ и $t_П$ – время нагрузки и время паузы. Стандартные значения *ПВ* составляют 15, 25, 40 и 60%.

Коэффициент перегрузки по мощности k_P показывает, во сколько раз можно увеличить мощность источников теплоты в электрическом аппарате при повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с мощностью при продолжительном режиме при условии равенства допустимой температуры в том и другом случаях.

Если $t_{НГ} + t_П \le 0{,}1\vartheta_o$, то в этом случае, с погрешностью не более 5% можно определить

$$k_P = \frac{t_{НГ} + t_П}{t_{НГ}}.$$

Поскольку, при прочих равных условиях, мощность источников теплоты в большинстве случаев пропорциональна квадрату тока, то вводится *коэффициент перегрузки по току* k_I, который равен $k_I = \sqrt{k_P}$.

Наиболее общим является *перемежающийся режим* (рис. 1.2, *в*) когда в период t_1 проходит ток I_1, а в период t_2 – ток I_1, причём $I_1 \ne I_2$. В установившемся состоянии температура перегрева имеет максимум $\theta_{\max}$ и минимум $\theta_{\min}$. Если по аппарату длительное время проходит ток I_1, то установившаяся температура перегрева равна $\theta_y^{/}$. Аналогично, току I_2 соответствует температура перегрева $\theta_y^{//}$. По прошествии некоторого времени $\theta_{\max}$ и $\theta_{\min}$ соседних циклов станут одинаковыми. Наступит так называемый *квазистационарный («мнимостационарный») режим* работы с неизменными значениями $\theta_{\max}$ и $\theta_{\min}$.

6.Термическая стойкость электрических аппаратов

Термической стойкостью электрических аппаратов называется способность их выдерживать без повреждений, препятствующих дальнейшей работе, термическое воздействие протекающих по токоведущим частям токов заданной длительности. Количественной характеристикой термической стойкости является ток термической стойкости, протекающий в течение определённого промежутка времени. Наиболее напряжённым является режим короткого замыкания, в процессе которого токи по сравнению с номинальными могут возрастать в десятки раз, а мощности источников теплоты – в сотни раз.

Термическая стойкость электрического аппарата зависит при этом не только от режима короткого замыкания, но и от теплового состояния, предшествующего режиму короткого замыкания.

При коротком замыкании электрические аппараты подвергаются значительным термическим воздействиям. Как правило, это аварийный режим работы и поэтому время его действия ограничивается до минимально возможного значения. Для большинства электрических аппаратов это время $t \le 0{,}1\vartheta_o$, т.е. не превосходит времени нагрева при адиабатическом процессе (нагрев без теплообмена с окружающей средой). Другими словами, режим короткого замыкания можно рассматривать как кратковременный режим работы, при котором температура электрического аппарата может достигать значений, превосходящих допустимую температуру в продолжительном режиме. Это возможно, поскольку время кратковременного режима обычно небольшое, за которое не может произойти существенных изменений в старении изоляции и других элементах, которые ограничивают температуру в продолжительном режиме работы.

Тем не менее, и в этом случае существуют ограничения, которые в основном диктуются температурой рекристаллизации материала токоведущих частей. В электрических аппаратах приняты следующие значения максимальной температуры при кратковременном режиме работы:

- неизолированные токоведущие части из меди и её сплавов – 300 °С;
- алюминиевые токоведущие части – 200 °С;
- токоведущие части (кроме алюминиевых), соприкасающиеся с органической изоляцией или маслом – 250 °С.

Расчётное время короткого замыкания стандартизовано и принято равным 1, 5 и 10 секундам.

КОММУТАЦИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Рассмотрены основные понятия о процессах коммутации, виды контактных соединений и их классификация, зависимость переходного сопротивления контактов от свойств материала. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников, явление сваривания электрических контактов, особенности горения и гашения дуги переменного тока. Способы гашения электрической дуги.

Цель занятия – рассмотреть процессы коммутации электрических цепей; параметры контактных соединений и их материалы; процессы в дуговом промежутке; условия гашения дуги; способы гашения дуги.

После изучения темы необходимо знать

1. физическую сущность процессов, протекающих в электрических контактах
2. физическую сущность процессов, происходящих в дуговом промежутке
3. способы гашения электрической дуги
4. параметры контактных соединений
5. зависимость переходного сопротивления от контактного нажатия

6. материалы контактных соединений

1. Контактные явления в электрических аппаратах

Электрический контакт – соприкосновение тел, обеспечивающее протекание тока в электрической цепи. Соприкасающиеся тела называются также контактами или контакт-деталями.

2. Классификация электрических контактов

Виды контактных соединений, наиболее часто встречающиеся в электрических аппаратах, классифицируются по различным признакам. По виду соединения электрические контакты могут быть:

- взаимонеподвижные: разъёмные (болтовое соединение); неразъёмные (сварные, паяные, напылённые);
- взаимоподвижные: неразмыкающиеся – предназначенные для осуществления передачи электрической энергии с неподвижных частей установки на подвижные или наоборот: гибкие связи типа «косичка», щёточные скользящие, жидкометаллические, роликовые;
- размыкающиеся – расходящиеся в процессе работы: мостиковые контакты, розеточные контакты, пальцевые или ножевые, с плоскими пружинами (рис. 2.1).

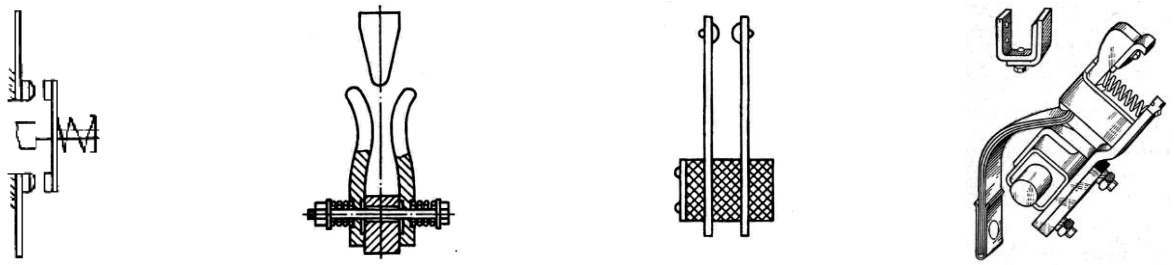


Рис. 2.1. Виды размыкающихся контактов

3. Контактная поверхность и контактное сопротивление

Для выяснения сущности явления электрического контакта рассмотрим механический контакт двух металлических твердых тел. При любой, сколь угодно чистой обработке два металлических тела соприкасаются не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках по микровыступам. Обычно, для обеспечения надежного протекания электрического тока, контакты сжимают силой, которая называется силой контактного нажатия. Эта сила может создаваться при затяжке болтов, при обжатии контактного наконечника на конце провода или кабеля или из-за деформации пружин контактной системы. При этом микровыступы, по которым произошел начальный контакт, деформируются; в соприкосновение могут прийти другие выступы и они также могут деформироваться. На поверхности образуются площадки, которые и воспринимают усилие контактного нажатия (рис. 2.2).

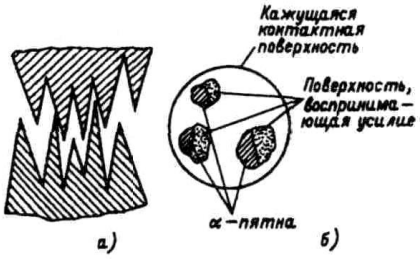


Рис. 2.2. Контакт твёрдых тел

Давление в разных точках поверхности контактных площадок в общем случае не одинаково и может вызывать как упругие, так и пластические деформации.

Таким образом, механический контакт двух тел происходит не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках, а при сжатии их силой - по отдельным площадкам.

Общая поверхность тел, с которой производится контакт, называется *кажущейся контактной поверхностью.* На этой поверхности можно увидеть площадки, полученные в результате деформации микро выступов, которые воспринимают усилие. Эта часть контактной поверхности называется *поверхностью, воспринимающей усилие.*

Очевидно, что электрический ток может проходить только в точках контактной поверхности, в которых имеет место механический контакт, т. е. через точки поверхности, воспринимающие усилие. Однако условие механического контакта является необходимым, но недостаточным для протекания тока.

При ближайшем рассмотрении поверхности, воспринимающей усилие, можно видеть, что она весьма неоднородна, а именно: в общем случае одна часть ее покрыта *плёнками оксидов*, другая – *адгезионными слоями атомов кислорода* и, наконец, третья часть представляет собой чисто *металлическую поверхность*.

Для прохождения электрического тока поверхность, покрытая оксидными пленками, обладает большим электрическим сопротивлением, поскольку удельное сопротивление оксидов на несколько порядков выше удельного сопротивления чистых металлов.

Через поверхность, покрытую адгезионными слоями кислорода, электрический ток может протекать за счет туннельного эффекта, заключающегося в проникновении электронов через потенциальный барьер. Этот участок поверхности имеет квазиметаллический характер проводимости.

И, наконец, третья часть поверхности проводит свободно электрический ток благодаря чисто металлической проводимости.

Квазиметаллические и металлические поверхности контакта принято называть α-пятнами. Это именно те части контактной поверхности, через которые в электрических контактах протекает ток.

В электрических контактах ток проходит только через небольшую часть кажущейся контактной поверхности, и, следовательно, он должен испытывать сопротивление при прохождении через зону контакта.

Рассмотрим однородный линейный проводник постоянного поперечного сечения (рис. 2.3), по которому протекает постоянный ток I. Между точками *а* и *б*, находящимися на расстоянии l, измерим разность потенциалов U_1. Тогда активное сопротивление участка проводника $R_1 = U_1/I$.

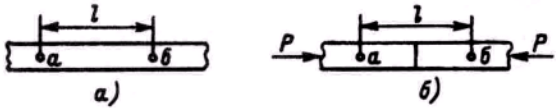


Рис. 2.3. К определению переходного сопротивления контактов: *а* - проводник; *б* - проводник с контактом.

Разрежем проводник в средней части *l* и затем снова соединим его, сжав силой *P*. При протекании того же тока *I* получим разность потенциалов между точками *а* и *б* равную U_2 и отличную от разности потенциалов U_1. В этом опыте сопротивление $R_2 = U_2/I$. Разность сопротивлений $R_{пер} = R_2 - R_1$ называется *переходным сопротивлением контакта.*

Следует отметить, что если на некотором удалении от α-пятна линии тока параллельны друг другу, то в непосредственной близости от него они искривляются и «стягиваются» к α-пятну. Область электрического контакта, где линии тока искривляются, стягиваясь к α-пятну, называется *областью стягивания.*

В областях стягивания поперечное сечение проводника используется не полностью для протекания электрического тока, что и приводит к появлению дополнительного сопротивления. Это сопротивление называется *сопротивлением стягивания*.

Переходное сопротивление контакта зависит от обработки поверхности. Шлифовка ведёт к тому, что на поверхности остаются более пологие выступы с большим сечением. Смятие таких выступов затруднено, поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Наличие окисных плёнок приводит к тому, что при небольшом напряжении замыкаемой цепи или недостаточной силе нажатия на контакты протекание электрического тока становится невозможным. В связи с этим контакты на малые токи или на малые усилия нажатия изготовляются из благородных металлов, не поддающихся окислению (золото, платина и др.).

В сильноточных (сильнотоковых) контактах окисная плёнка разрушается либо благодаря большим усилиям нажатия, либо путём самозачистки при включении за счёт проскальзывания одного контакта относительно другого.

4. Зависимость переходного сопротивления от свойств материала контактов

Переходное сопротивление чрезвычайно чувствительно к окислению поверхности ввиду того, что окислы многих металлов (в частности, меди) являются плохими проводниками. У медных открытых контактов вследствие их окисления с течением времени переходное сопротивление может возрасти в тысячи раз.

В процессе длительного пребывания под током на поверхности замкнутых контактов также возникают окисные, плохо проводящие ток плёнки. Они проникают к площадкам контактирования и, увеличивая тем самым переходное сопротивление, могут вывести контакты из строя. Повышение температуры ускоряет степень окисления поверхности контактов. Повышение силы

контактного нажатия, наоборот, затрудняет проникновение окисных плёнок к площадкам контактирования, повышая тем самым срок службы контактов.

Окислы серебра имеют электрическую проводимость, близкую к проводимости чистого серебра. При повышенных температурах окислы серебра разрушаются. Поэтому переходное сопротивление контактов из серебра практически не изменяется с течением времени. Оно даже может понизиться вследствие медленной пластической деформации материала в площадках контактирования. Для медных контактов применяются специальные меры по уменьшению окисления их рабочих поверхностей.

В разборных соединениях производят антикоррозионные покрытия рабочих поверхностей – серебрят, лудят, покрывают кадмием, никелируют и цинкуют. Применяют покрытие рабочих поверхностей нейтральной смазкой после их технического обслуживания.

Коммутирующие контакты, длительно работающие под током не выключаясь, выполняются, как правило, из серебра или металлокерамики на основе серебра. Для медных контактов снижается значение тока нагрузки по сравнению с допустимым значением. Тем самым снижаются нагрев контактов и интенсивность их окисления.

Возникающая при отключении дуга сжигает окислы, и переходное сопротивление снижается. Во многих аппаратах кинематическая схема предусматривает при замыкании некоторое проскальзывание одного контакта по другому. Образовавшаяся окисная пленка при этом разрушается.

Материалы большей твердости имеют большее переходное сопротивление и требуют большего контактного нажатия. Чем выше электрическая проводимость и теплопроводность материала, тем ниже переходное сопротивление.

5. Влияние переходного сопротивления контактов на нагрев проводников

Наличие переходного сопротивления контактов неизбежно приводит к тому, что в зоне контакта выделяется тепло, т. е. всякий электрический контакт является дополнительным источником тепла. В контактном соединении можно выделить зону стягивания, т. е. ту часть проводников, прилегающих к поверхности контакта, в которой сосредоточено сопротивление стягивания. Разумеется, сопротивление, обусловленное наличием окисных пленок, также сосредоточено в этой зоне, непосредственно между поверхностями контакта.

Ввиду того, что наружная поверхность зоны стягивания невелика, в первом приближении можно пренебречь количеством теплоты, отдаваемой в окружающую среду непосредственно этой поверхностью, и считать, что теплота, генерируемая в этой зоне, распространяется в части проводника, прилегающей к этой зоне, а далее с поверхности проводников - в окружающую среду.

При прохождении тока нагревается само тело проводника, что приводит к увеличению падения напряжения на этом участке электрической цепи. Кроме этого, изменяется сопротивление стягивания и увеличивается падение напряжения на переходном сопротивлении контакта $U_k = IR_{ПЕР}$.

Известно, что для каждого материала существуют определённые падения напряжения на контактах, при которых температура контактного пятна достигает значений, характеризующих фазовое состояние материала. Так, температуре

рекристаллизации соответствует напряжение размягчения. Температуре плавления материала соответствует напряжение плавления, а температуре кипения – напряжение кипения. Для некоторых металлов значения этих напряжений приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Название металла	$U_{размягчения}$, ($U_р$), В	$U_{плавления}$, ($U_{пл}$), В	$U_{кипения}$, ($U_{кип}$), В
Медь (Cu)	0, 12	0, 43	0, 79
Серебро (Ag)	0, 09	0, 37	0, 68
Платина (Pt)	0, 25	0, 65	1, 50
Вольфрам (W)	0, 40	1, 10	2, 10
Золото (Au)	0, 08	0, 43	0, 90

С ростом падения напряжения на контакте $U_к$ переходное сопротивление вначале растёт, а затем, при напряжении $U_р$ происходит резкое падение механических свойств материала. При том же усилии нажатия увеличивается площадь контактирования и переходное сопротивление резко уменьшается. В дальнейшем оно снова линейно возрастает, а при напряжении $U_{пл}$ электрический контакт сваривается – переходное сопротивление снова резко уменьшается.

6. Сваривание электрических контактов

Использование контактов при условии, что напряжение $U_к$ не превзойдёт напряжения $U_р$ возможно лишь в слаботочных (слаботоковых) аппаратах. В сильнотоковых аппаратах, предназначенных для работы в режимах короткого замыкания, условие $U_K < U_P$ или $U_K < U_{ПЛ}$ привело бы к необходимости создания чрезмерно больших усилий сжатия контактов. Поэтому в сильнотоковых аппаратах не исключено расплавление α-пятна в замкнутом состоянии контактов, что может привести к свариванию контактов так, как это происходит при точечной электросварке.

7. Износ контактов

Под износом контактов понимают разрушение рабочей поверхности коммутирующих контактов, приводящее к изменению их геометрической формы, размера, массы и т.д.

Износ, происходящий под действием электрических факторов, называется *электрическим износом – электрической эрозией* контактов. Износ под действием механических факторов здесь не рассматривается, он обычно много меньше электрического.

При размыкании сила, сжимающая контакты, снижается до нуля, резко возрастают переходное сопротивление контакта и плотность тока в последней площадке контактирования. Площадка сильно разогревается, и между расходящимися контактами образуется контактный перешеек (мостик) из расплавленного металла, который в дальнейшем рвется. При этом в промежутке между контактами могут возникнуть различные формы электрического разряда.

Мостиковую эрозию контактов можно объяснить термоэлектрическими эффектами, приводящими к асимметрии расплавленного металлического мостика (рис. 2.5), что в конечном счете приводит к переносу материала с одного контакта на другой.

В результате термоэлектрических эффектов максимум температуры приходится не на середину расплавленного мостика М а смещен от нее на Δx в сторону переноса теплоты. При разрыве он нарушается по изотерме с температурой T_{max} и на одном участке остается больше металла, чем на другом. Застывший металл при большом числе отключений образует неправильные формы контактов. Эффектные меры борьбы с эрозией состоят в создании симметричных тепловых режимов мостика, например, подбором соответствующих контактных пар.

Электрическая эрозия наблюдается при небольших токах; при больших токах характерен дуговой износ контактов. Он определяет *коммутационную износостойкость аппарата,* его способность выполнять определенное число коммутаций тока контактами в заданных условиях отключения цепи. Она выражается предельным для аппарата числом коммутационных циклов. *Механическая износостойкость аппарата* определяется его способностью выполнять определенное число операций отключения и отключения без тока в цепи главных контактов.

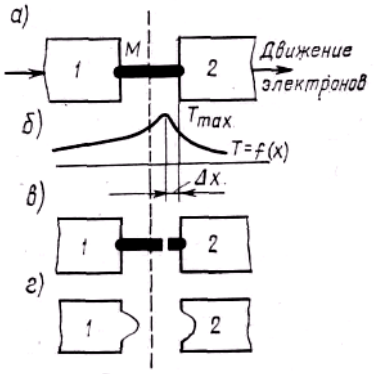


Рис. 2.5. Фазы мостиковой эрозии контактов

Дуговой износ контактов – это выгорание материала контактов под воздействием электрической дуги.

Энергия, сосредоточенная в небольших объемах, разогревает металл, плавит его и доводит до температуры кипения. Материал контактов выбрасывается в виде паров металла и капель.

8. Параметры контактных соединений

Раствор контактов представляет собой кратчайшее расстояние между разомкнутыми контактными поверхностями подвижного и неподвижного контактов. Зазор контактов обычно выбирается из условия гашения малых токов.

При работе контакты изнашиваются. Чтобы обеспечить надежное их соприкосновение на длительный срок, кинематика аппарата выполняется таким образом, что контакты соприкасаются раньше, чем подвижная система (система перемещения подвижных контактов) доходит до упора. Контакт крепится к подвижной системе через пружину. Благодаря этому, после соприкосновения с

неподвижным контактом, подвижный контакт останавливается, а подвижная система продвигается еще вперед до упора, сжимая дополнительно при этом контактную пружину.

Таким образом, если при замкнутом положении подвижной системы убрать неподвижно закрепленный контакт, то подвижный контакт сместится на некоторое расстояние, называемое *провалом*. Провал определяет запас на износ контактов при заданном числе срабатываний. При прочих равных условиях больший провал обеспечивает более высокую износостойкость, т.е. больший срок службы. Но больший провал, как правило, требует и более мощной приводной системы.

Контактное нажатие – сила, сжимающая контакты в месте их соприкосновения. Различают начальное нажатие в момент начального соприкосновения контактов, когда провал равен нулю, и конечное нажатие при полном провале контактов. По мере износа контактов уменьшается провал, а, следовательно, и дополнительное сжатие пружины. Конечное нажатие приближается к начальному. Таким образом, начальное нажатие является одним из основных параметров, при котором контакт должен сохранять работоспособность.

9.Основные материалы, применяемые в аппаратостроении

Материалы, применяемые в аппаратостроении, могут быть разбиты на следующие группы:

- проводниковые – медь, алюминий, латунь и др.;
- магнитные – различного рода электротехнические стали и сплавы для изготовления магнитопроводов;
- изоляционные – для электрической изоляции токоведущих частей друг от друга и от заземлённых элементов;
- дугостойкие изоляционные – асбест, керамика, пластмассы для дугогасительных камер;
- сплавы с высоким удельным сопротивлением – для изготовления различных резисторов;
- контактные – серебро, медь, металлокерамика для обеспечения высокой электрической износостойкости контактов;
- биметаллы – применяются в автоматических аппаратах, использующих линейное удлинение различных металлов при нагревании электрическим током;
- конструкционные – металлы, пластмассы и изоляционные материалы, служащие для придания аппаратам и их деталям тех или иных форм и для изготовления деталей, преимущественным назначением которых является передача и восприятие механических усилий.

Материалы для контактных соединений

К материалам контактов предъявляются следующие требования:

- высокая электрическая проводимость и большая теплопроводность;
- стойкость против коррозии в воздухе и других газах;
- стойкость против образования окисных плёнок с высоким удельным сопротивлением;
- малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;
- высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;

- малая электрическая эрозия;
- высокая дугостойкость (температура плавления);
- высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;
- простота обработки, низкая стоимость.

Для контактных соединений применяются следующие материалы, свойства которых рассмотрены ниже.

Медь. *Положительные свойства:* высокие электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях и отключениях.

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

Серебро. *Положительные свойства:* высокая электропроводность и теплопроводность, плёнка окислов серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки. Устойчивость контакта и малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Отрицательные свойства: малая дугостойкость и недостаточная твердость серебра препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и при частых включениях и отключениях. Применяется при токах до 20 А.

Алюминий. Этот материал имеет достаточно высокую электрическую проводимость и теплопроводность. Благодаря малой плотности токоведущая часть круглого сечения из алюминия на такой же ток, как и медный проводник, имеет почти на 48% меньшую массу. Это позволяет уменьшить массу аппарата.

Недостатки алюминия: образование на воздухе и в активных средах плёнок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); малая механическая прочность; при контакте с медью образуется пара, подверженная сильной *электрохимической коррозии*. В связи с этим при механическом соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром.

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

Вольфрам. Положительными свойствами вольфрама являются высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии и сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатками вольфрама являются: высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, образование прочных оксидных и сульфидных пленок. В связи с высокой механической прочностью и образованием пленок вольфрамовые контакты требуют большой силы нажатия.

Платина, золото, молибден. Применяются для коммутирующих контактов на очень малые токи при малых нажатиях. Платина и золото не образуют окисных плёнок. Контакты из этих металлов имеют малое переходное сопротивление. Для повышения износостойкости применяют сплавы из платины с иридием, молибденом или палладием.

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

Материалы, обладающие желаемыми свойствами, получают методом порошковой металлургии. *Металлокерамика* – это механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов, получаемая методом спекания смеси их порошков при высокой температуре и давлении. Физические свойства металлов при изготовлении металлокерамических контактов сохраняются. Дугостойкость керамике сообщается такими металлами, как вольфрам, молибден. Для получения низкого переходного сопротивления контакта в качестве второго компонента используют серебро или медь. Наиболее распространёнными композициями металлокерамики являются: серебро – вольфрам; серебро – молибден; серебро – никель; серебро – окись кадмия; серебро – графит; серебро – окись меди и др.

10. Коммутация электрической цепи

Коммутация электрической цепи – процесс замыкания или размыкания цепи с током.

Коммутация может происходить под воздействием внешних или внутренних для данного устройства источников напряжения или тока.

При анализе и расчёте процессов коммутации необходимо учитывать общий закон коммутации:

- При коммутации индуктивных электрических цепей не могут изменяться скачком ток цепи и магнитный поток $(di/dt \neq \infty, d\Phi/dt \neq \infty)$;
- При коммутации емкостных цепей не могут изменяться скачком напряжение и электрический заряд $(dU/dt \neq \infty, dQ/dt \neq \infty)$.

Под *глубиной коммутации* понимают отношение сопротивления $R_{отк}$ коммутирующего органа в отключенном состоянии к сопротивлению $R_{вкл}$ во включенном состоянии

$$h_k = \frac{R_{отк}}{R_{вкл}}.$$

Контактные электрические аппараты, у которых сопротивление межконтактного промежутка в отключенном состоянии измеряется мегомами, а сопротивление замкнутых контактов – микроомами, обеспечивают глубину коммутации

$$h_k = 10^6 \div 10^{14}.$$

Для бесконтактных аппаратов, которые по глубине коммутации уступают контактным аппаратам, обычно $h_k = 10^4 \div 10^7$.

11. Отключение электрической цепи контактными аппаратами

Отключение цепи контактным аппаратом характеризуется возникновением плазмы, которая проходит разные стадии газового разряда в процессе преобразования межконтактного промежутка из проводника электрического тока в изолятор.

При токах выше 0,5-1 А возникает стадия дугового разряда (область *1*) (рис. 2.1.); при снижении тока возникает стадия тлеющего разряда у катода (область *2*); следующая стадия (область *3*)– таунсендовский разряд, и наконец, область *4* – стадия изоляции, в которой носители электричества – электроны и ионы – не образуются за счет ионизации, а могут поступать только из окружающей среды.

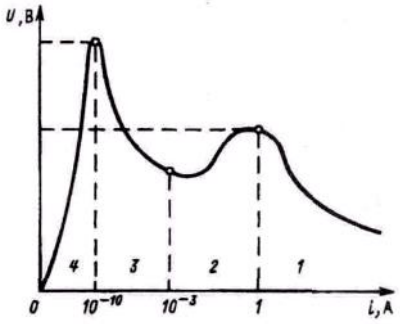


Рис. 2.1. Вольтамперная характеристика стадий электрического разряда в газах

Первый участок кривой – дуговой разряд (область *1)* –характеризуется малым падением напряжения у электродов и большой плотностью тока. С ростом тока напряжение на дуговом промежутке сначала резко падает, а затем изменяется незначительно.

Второй участок (область *2*) кривой, представляющий собой область тлеющего разряда, характеризуется высоким падением напряжения у катода (250 – 300 В) и малыми токами. С ростом тока возрастет падение напряжения на разрядном промежутке.

Таунсендовский разряд (область *3*) характеризуется чрезвычайно малыми значениями тока при высоких напряжениях.

Электрическая дуга сопровождается высокой температурой и связана с этой температурой. Поэтому дуга – явление не только электрическое, но и тепловое.

В обычных условиях воздух является хорошим изолятором. Так, для пробоя воздушного промежутка в 1 см требуется приложить напряжение не менее 30 кВ. Для того чтобы воздушный промежуток стал проводником, необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц: отрицательных – в основном свободных электронов, и положительных – ионов. Процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов с образованием свободных электронов и ионов называется *ионизацией.*

Ионизация газа может происходить под действием света, рентгеновских лучей, высокой температуры, под влиянием электрического поля и ряда других факторов. Для дуговых процессов в электрических аппаратах наибольшее значение имеют: из процессов, происходящих у электродов, – термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, а из процессов, происходящих в дуговом промежутке, – термическая ионизация и ионизация толчком.

12. Электрическая дуга

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

Основные свойства дугового разряда:

- дуговой разряд имеет место только при токах большой величины; минимальный ток дуги для металлов составляет примерно 0,5 А;
- температура центральной части дуги очень велика и в аппаратах может достигать 6000 – 18000 К;
- плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает $10^2 – 10^3$ А/мм^2;
- падение напряжения у катода составляет всего 10 – 20 В и практически не зависит от тока.

В дуговом разряде можно различить три характерные области: околокатодную, область столба дуги (ствол дуги) и околоанодную.

В каждой из этих областей процессы ионизации и деионизации протекают по-разному в зависимости от условий, которые там существуют. Поскольку результирующий ток, проходящий через эти три области, одинаков, в каждой из них происходят процессы, обеспечивающие возникновение необходимого количества зарядов.

13.Условия гашения дуги постоянного тока

Чтобы погасить электрическую дугу постоянного тока, необходимо создать такие условия, чтобы в дуговом промежутке при всех значениях тока процессы деионизации протекали бы интенсивнее, чем процессы ионизации.

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую сопротивление *R*, индуктивность *L* и дуговой промежуток с падением напряжения $U_Д$, к которой приложено напряжение *U* (рис. 2.5, *а*). При дуге, имеющей неизменную длину, для любого момента времени будет справедливо уравнение баланса напряжений в этой цепи:

$$U = iR + L\frac{di}{dt} + U_Д,$$

где $L\frac{di}{dt}$ – падение напряжения на индуктивности при изменении тока.

Стационарным режимом будет такой, при котором ток в цепи не меняется, т.е. $\frac{di}{dt} = 0,$ а уравнение баланса напряжений примет вид:

$$U = iR + U_Д.$$

Для погасания электрической дуги необходимо, чтобы ток в ней всё время уменьшался, т.е. $\frac{di}{dt} < 0$, а $U_Д > U - iR.$

14.Способы воздействия на электрическую дугу в коммутационных аппаратах

Цель воздействия на столб возникающей в аппарате дуги состоит в увеличении её активного электрического сопротивления вплоть до бесконечности, когда коммутационный орган переходит в изоляционное состояние. Практически всегда это достигается путем интенсивного охлаждения столба дуги, уменьшения её температуры и теплосодержания, в результате чего снижается степень ионизации и количество носителей электричества и ионизированных частиц и повышается электрическое сопротивление плазмы.

Для успешного гашения электрической дуги в коммутационных низковольтных аппаратах необходимо выполнить следующие условия:

- увеличить длину дуги путем её растяжения или увеличения числа разрывов на полюс выключателя;
- переместить дугу на металлические пластины дугогасительной (деионной) решётки, которые являются как радиаторами, поглощающими тепловую энергию столба дуги, так и разбивают её на ряд последовательно соединённых дуг;
- переместить столб дуги магнитным полем в щелевую камеру из дугостойкого изоляционного материала с большой теплопроводностью, где дуга интенсивно охлаждается, соприкасаясь со стенками;
- образовывать дугу в закрытой трубке из газогенерирующего материала – фибры; выделяемые под воздействием температуры газы создают высокое давление, что способствует гашению дуги;
- уменьшить концентрацию паров металлов в дуге, для чего на этапе проектирования аппаратов использовать соответствующие материалы;
- гасить дугу в вакууме; при очень низком давлении газа недостаточно атомов газа, чтобы ионизировать их и поддержать проведение тока в дуге; электрическое сопротивление канала столба дуги становится очень высоким и дуга гаснет;
- размыкать контакты синхронно перед переходом переменного тока через нуль, что существенно снижает выделение тепловой энергии в образовавшейся дуге, т.е. способствует гашению дуги;
- применять чисто активные сопротивления, шунтирующие дугу и облегчающие условия её гашения;
- применять шунтирующие межконтактный промежуток полупроводниковые элементы, переключающие на себя ток дуги, что практически исключает образование дуги на контактах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ, НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО КОНТАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.Контакторы постоянного тока предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие электромагнитом постоянного тока.

Ниже описываются категории применения современных контакторов и приводятся параметры коммутируемых ими цепей в зависимости от характера нагрузки.

Контакторы постоянного тока:

ДС-1 — активная или малоиндуктивная нагрузка.

ДС-2—пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения.

ДС-3—пуск электродвигателей с параллельным возбуждением и их отключение при неподвижном состоянии или медленном вращении ротора.

ДС-4—пуск электродвигателей с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения.

ДС-5—пуск электродвигателей с последовательным возбуждением, отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей, торможение противотоком.

Общие требования к контакторам:

1.Высокая включающая и отключающая способность – не ниже $10I_{ном,}$ а в отдельных случаях до $20I_{ном}$;

2. Длительная работа при большой частоте отключений;

3. Высокая коммутационная износостойкость – до 3 млн. циклов с учетом отключений пусковых токов;

4. Высокая механическая износостойкость;

5. Технологичность конструкции, малая масса и габариты;

6. Высокая надёжность в эксплуатации.

Для контакторов существует еще режим редких коммутаций, характеризуемый более тяжелыми условиями, чем при нормальных коммутациях. Такие режимы возникают довольно редко (например, при КЗ).

Основными техническими данными контакторов являются номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение коммутируемой цепи, механическая и коммутационная износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения и отключения. Способность контактора, как и любого коммутационного аппарата, обеспечить работу при большом числе операций характеризуется износостойкостью.

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

Коммутационная износостойкость определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка $(2—3)10^6$ операций (некоторые выпускаемые в настоящее время контакторы имеют коммутационную износостойкость 10^6 операций и менее).

Собственное время включения состоит из времени нарастания потока в электромагните контактора до значения потока трогания и времени движения якоря. Большая часть этого времени тратится на нарастание магнитного потока. Для контакторов постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время включения составляет 0,14с, для контакторов с током 630 А оно увеличивается до 0,37с.

Собственное время отключения - время с момента обесточивания электромагнита контактора до момента размыкания его контактов. Оно

определяется временем спада потока от установившегося значения до потока отпускания. Временем с начала движения якоря до момента размыкания контактов можно пренебречь. В контакторах постоянного тока с номинальным током 100 А собственное время отключения составляет 0,07, в контакторах с номинальным током 630 А — 0,23 с.

Номинальный ток контактора $I_{ном}$ представляет собой ток, который можно пропускать по замкнутым главным контактам в течение 8 часов без коммутаций, причем превышение температуры различных частей контактора не должно быть больше допустимого (прерывисто-продолжительный режим работы).

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

Номинальным напряжением называется наибольшее напряжение коммутируемой цепи, для работы при котором предназначен контактор. Коммутационная износостойкость главных контактов для категорий ДС-2, ДС-4 в режиме нормальных коммутаций должна быть не менее 0,1, а для категорий ДС-3 не менее 0,02 механической износостойкости. Вспомогательные контакты должны коммутировать цепи электромагнитов переменного тока, у которых пусковой ток может во много раз превышать установившийся.

Контактор имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, электромагнит и систему вспомогательных контактов. При подаче напряжения на обмотку электромагнита контактора его якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем электромагнита, замыкает или размыкает главную цепь. Дугогасительное устройство обеспечивает быстрое гашение дуги, благодаря чему достигается малый износ контактов. Система вспомогательных слаботочных контактов служит для согласования работы контактора с другими устройствами.

2.Контактная система. Контакты аппарата подвержены наиболее сильному электрическому и механическому износу ввиду большого числа операций в час и тяжелым условиям работы. С целью уменьшения износа преимущественное распространение получили линейные перекатывающиеся контакты.

Для предотвращения вибраций контактов контактная пружина создает предварительное нажатие, равное примерно половине конечной силы нажатия. Большое влияние на вибрацию оказывает жесткость крепления неподвижного контакта и стойкость к вибрациям всего контактора в целом. В этом отношении очень удачна конструкция контактора серии КПВ-600 (рис.1). Неподвижный контакт *1* жестко прикреплен к скобе *2*. Один конец дугогасительной катушки *3* присоединен к этой же скобе. Второй конец катушки вместе с выводом *4* надежно скреплен с изоляционным основанием из пластмассы *5*. Последнее крепится к прочной стальной скобе *6*, которая является основанием аппарата. Подвижный контакт *7* выполнен в виде толстой пластины. Нижний конец пластины имеет возможность поворачиваться относительно точки опоры *8*. Благодаря этому пластина может перекатываться по сухарю неподвижного контакта *1*. Вывод *9*

соединяется с подвижным контактом *7* с помощью гибкого проводника (связи) *10*. Контактное нажатие создается пружиной *12*.

При износе контактов сухарь *1* заменяется новым, а пластина подвижного контакта поворачивается на 180° и неповрежденная сторона ее используется в работе.

Для уменьшения оплавления основных контактов дугой при токах более 50 А контактор имеет дугогасительные контакты — рога *2, 11*. Под действием магнитного поля дугогасительного устройства опорные точки дуги быстро перемещаются на скобу *2*, соединенную с неподвижным контактом *1*, и на защитный рог подвижного контакта *11*. Возврат якоря в начальное положение (после отключения магнита) производится пружиной *13*.

Основным параметром контактора является номинальный ток, который определяет размеры контактора.

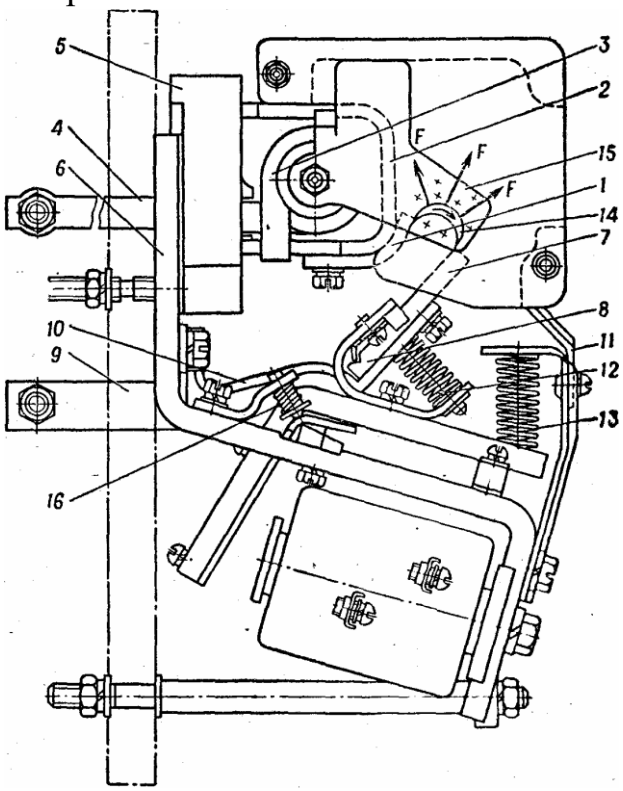


Рис.1. Контактор постоянного тока серии КПВ-600.

Характерной особенностью контакторов КПВ-600 и многих других типов является электрическое соединение вывода подвижного контакта с корпусом контактора. Во включенном положении контактора магнитопровод находится под напряжением. Даже в отключенном положении напряжение может оставаться на магнитопроводе и других деталях. Соприкосновение с магнитопроводом поэтому опасно для жизни.

Серия контакторов КПВ имеет исполнение с размыкающим главным контактом. Замыкание производится за счет действия пружины, а размыкание - за счет силы, развиваемой электромагнитом.

Номинальным током контактора называется ток прерывисто-продолжительного режима работы. При этом режиме работы контактор находится во включенном состоянии не более 8 ч. По истечении этого промежутка аппарат должен быть

несколько раз включен и отключен (для зачистки контактов от окиси меди). После этого аппарат снова включается.

Если контактор располагается в шкафу, то номинальный ток понижается примерно на 10% из-за ухудшающихся условий охлаждения.

В продолжительном режиме работы, когда длительность непрерывного включения превышает 8 ч, допустимый ток контактора снижается примерно на 20%. В таком режиме из-за окисления медных контактов растет переходное сопротивление, что может привести к повышению температуры выше допустимой величины. Если контактор имеет небольшое число включений или вообще предназначен для длительного включения, то на рабочую поверхность контактов напаивается серебряная пластина. Серебряная облицовка позволяет сохранить допустимый ток контактора, равный номинальному току, и в режиме продолжительного включения. Если контактор наряду с режимом продолжительного включения используется в режиме повторно-кратковременного включения, применение серебряных накладок становится нецелесообразным, так как из-за малой механической прочности серебра происходит быстрый износ контактов.

Согласно рекомендациям завода допустимый ток повторно-кратковременного режима для контактора КПВ-600 определяется по формуле:

$$I_{п.к} = \frac{I_н}{\sqrt{ПВ + \frac{n}{600} ПВ}},$$

где n – число включений в час.

Необходимо отметить, что если при отключении в повторно-кратковременном режиме длительно горит дуга (отключается большая индуктивная нагрузка), то температура контактов может резко увеличиться за счет нагрева контактов дугой. В этом случае нагрев контактов в продолжительном режиме работы может быть меньше, чем в повторно-кратковременном режиме. Как правило, контактная система имеет один полюс.

Для реверса асинхронных двигателей при большой частоте включений в час (до 1200) применяется сдвоенная контактная система. В этих контакторах типа КТПВ-500, имеющих электромагнит постоянного тока, подвижные контакты изолированы от корпуса, что делает более безопасным обслуживание аппарата. На рис.2 показана схема включения контакторов для реверса асинхронных двигателей. По сравнению со схемой, имеющей однополюсные контакторы, схема рис.2 имеет большое преимущество. При неполадках и отказе одного контактора подается напряжение только на один зажим двигателя. В схеме с однополюсными контакторами отказ одного контактора ведет к возникновению тяжелого режима двухфазного питания двигателя.

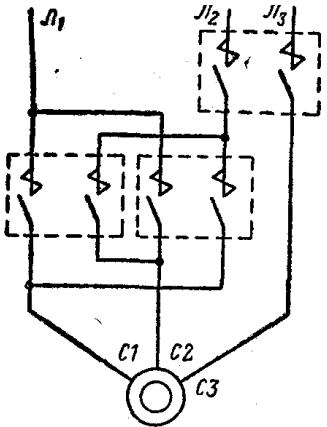


Рис.2. Схема включения главных контактов контактора КТПВ-500 для реверса асинхронного двигателя.

Контакторы с двухполюсной контактной системой очень удобно использовать для закорачивания сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя.
В контакторах типа КМВ-521 применяется также двухполюсная система. Эти контакторы предназначены для включения и отключения мощных электромагнитов приводов постоянного тока масляных выключателей. Наличие двухполюсной контактной системы, включенной в оба провода сети постоянного тока, обеспечивает надежное отключение индуктивной нагрузки.

3.Материалы контактов, раствор и провал контактов.

К материалу контактов предъявляются следующие требования:
1. Высокие электрическая проводимость и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии в воздухе и других газах.
3. Стойкость против образования пленок с высоким удельным сопротивлением.
4. Малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия.
5. Высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях.
6. Малая эрозия.
7. Высокая дугостойкость (температура плавления).
8. Высокие значения тока и напряжения, необходимых для дугообразования.
9. Простота обработки, низкая стоимость.

Свойства некоторых контактных материалов рассмотрены ниже.

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

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

Серебро. Положительные свойства: высокие электро- и теплопроводность, пленка окисла серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки. Контакт серебра устойчив, благодаря малой механической прочности достаточны малые нажатия (применяется при нажатиях 0,05 Н и выше). Устойчивость контакта, малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Отрицательные свойства: малая дугостойкость и недостаточная твердость серебра препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и при частых

включениях и отключениях.

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

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

Недостатки алюминия: образование на воздухе и в активных средах пленок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); малая механическая прочность; при контакте с медью образуется пара, подверженная сильной электрохимической коррозии. В связи с этим при соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром.

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

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

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

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

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

Основные необходимые свойства контактного материала — высокие электрическая проводимость и дугостойкость — не могут быть получены за счет сплавов таких материалов, как серебро и вольфрам, медь и вольфрам, так как эти металлы не образуют сплавов. Материалы, обладающие желаемыми свойствами, получают методом порошковой металлургии (металлокерамики). Физические свойства металлов при изготовлении металлокерамических контактов сохраняются. Дугостойкость керамике сообщается такими металлами, как вольфрам, молибден. Для получения низкого переходного сопротивления контакта в качестве второго компонента используют серебро или медь. Чем больше в материале вольфрама, тем выше дугостойкость, механическая прочность, сопротивление свариванию. Но соответственно растет сопротивление контактов, уменьшается теплопроводность. Обычно металлокерамика с содержанием вольфрама выше 50% применяется для тяжело нагруженных аппаратов, отключающих большие токи короткого замыкания.

Для контактов аппаратов высокого напряжения наибольшее распространение получила металлокерамика КМК-А60, КМК-А61, МК-Б20, КМК-Б21.

В аппаратах низкого напряжения наибольшее распространение получила

металлокерамика КМК-А10 из серебра и окиси кадмия CdO. Отличительной особенностью этого материала является диссоциация CdO на пары кадмия и кислород. Выделяющийся газ заставляет дугу быстро перемещаться по поверхности контакта, что значительно снижает температуру контакта и способствует деионизации дуги.

Металлокерамика, состоящая из серебра и 10% окиси меди, МК-А20 еще более стойка к износу, чем КМК-А10.

Серебряно-никелевые контакты хорошо обрабатываются, обладают высокой стойкостью против электрического износа. Контакты дают низкое и устойчивое в эксплуатации переходное сопротивление. Однако они легче свариваются, чем контакты из материала КМК-А60, КМК-Б20, КМК-А10.

Серебряно-графитовые и медно-графитовые контакты благодаря высокой устойчивости против сваривания применяются как дугогасительные контакты.

В заключение следует отметить, что хотя применение металлокерамики увеличивает стоимость аппаратуры в эксплуатации, эти «лишние» затраты быстро окупаются, так как возрастает срок службы аппарата, увеличивается время между ревизиями и значительно повышается надежность.

Под провалом контактов подразумевается величина смещения подвижного контакта на уровне точки его касания с неподвижным контактом в случае, если неподвижный будет удален.

Провал контактов обеспечивает надежное замыкание цепи, когда толщина контактов уменьшается вследствие выгорания их материала под действием электрической дуги. Величина провала определяет запас материала контактов на износ в процессе работы контактора.

После соприкосновения контактов происходит перекатывание подвижного контакта по неподвижному. Контактная пружина создает определенное нажатие в контактах, поэтому при перекатывании происходит разрушение окисных пленок и других химических соединений, которые могут появиться на поверхности контактов. Точки касания контактов при перекатывании переходят на новые места контактной поверхности, не подвергавшиеся воздействию дуги и являющиеся, поэтому более «чистыми». Все это уменьшает переходное сопротивление контактов и улучшает условия их работы. В то же время перекатывание повышает механический износ контактов (контакты изнашиваются).

Раствором контактов называется расстояние между подвижным и неподвижным контактами в отключенном состоянии контактора. Раствор контактов обычно лежит в пределах от 1 до 20 мм. Чем ниже раствор контактов, тем меньше ход якоря приводного электромагнита. Это приводит к уменьшению в электромагните рабочего воздушного зазора, магнитного сопротивления, намагничивающей силы, мощности катушки электромагнита и его габаритов. Минимальная величина раствора контактов определяется: технологическими и эксплуатационными условиями, возможностью образования металлического мостика между контактами при разрыве цепи тока, условиями устранения возможности смыкания контактов при отскоке подвижной системы от упора при отключении аппарата. Раствор контактов также должен быть достаточным для обеспечения условий надежного гашения дуги при малых токах.

4. Гашение электрической дуги, устройства для создания магнитного дутья, силы, перемещающие дугу в дугогасительную камеру.

Дугогасительное устройство. В контакторах постоянного тока наибольшее распространение получили устройства с электромагнитным дутьем. При взаимодействии магнитного поля с дугой возникает электродинамическая сила, перемещающая дугу с большой скоростью. Для улучшения охлаждения дуги ее загоняют в щель из дугостойкого материала с высокой теплопроводностью. При расхождении контактов *1* и *7* (смотреть рис.1) между ними возникает дуга *14***.** Дугу можно рассматривать как проводник с током. Катушка *8* создает м. д. с., под действием которой возникает поток. Этот поток проходит через сердечник катушки, полюсные наконечники *15* и воздушный зазор, в котором горит дуга. На рис.1 крестиками показано направление магнитного потока между полюсами системы, направленного за плоскость чертежа.

Наличие внешнего магнитного поля способствует резкому сокращению раствора контактов в области малых токов и незначительно сказывается на процесс гашения при токах 100 А и выше. Наиболее оптимальной магнитной индукцией является B ==0,0069 Т

В области малых токов с ростом тока увеличивается необходимый для гашения раствор контактов. При заданной скорости их движения требуется и большее время для достижения необходимого раствора. В области больших токов процесс гашения определяется электродинамическими силами. Чем больше ток, тем больше скорость растяжения дуги динамическими силами, тем меньше время, необходимое для достижения дугой критической длины.

Хотя при токах выше 100 А применение магнитного дутья кажется излишним (рис.4 и рис.5), во всех контакторах на токи 100 А и выше такая система обязательно применяется. Дело в том, что наличие внешнего магнитного поля способствует быстрому перемещению опорных точек дуги на контактах, перегоняя ее на дугогасительные электроды — рога и тем самым уменьшая оплавление контактов. Как показали исследования, для каждого значения тока имеется свое оптимальное значение поля. При напряженности, большей оптимальной, наступает усиленный износ контактов за счет того, что жидкометаллический контактный мостик, образующийся в стадии размыкания контактов, уносится и распыляется сильным магнитным полем.

Величина напряжения отключаемой цепи утяжеляет процесс гашения дуги только в области малых токов до 30 А. В области с токами выше 100 А, когда решающую роль играют электродинамические силы, величина питающего напряжения практически не влияет на раствор контактов. Раствор контактов обычно берется (10—17)*10^{-3} м и определяется условиями гашения малого тока.

Характер нагрузки отключаемой цепи также оказывает влияние только при малых токах в области, где гашение дуги происходит за счет механического растяжения дуги. В области больших токов следует опасаться больших перенапряжений и повторных пробоев из-за резкого снижения тока к нулю при сильном магнитном поле.

В зависимости от способа создания магнитного поля различают системы с последовательным включением катушки магнитного дутья (катушка тока), с

параллельным включением катушки (катушка напряжения) и системы с постоянным магнитом.

В случае применения катушки тока она обтекается током, проходящим в отключаемой цепи. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, то можно считать, что индукция пропорциональна отключаемому току. Тогда (**) можно преобразовать к виду:

$$F_1=k_1I^2.$$

Таким образом, сила, действующая на единицу длины дуги, пропорциональна квадрату тока.

Как было показано ранее, наиболее важно иметь необходимую величину магнитного поля для дутья в области малых токов. Система с катушкой тока обладает как раз тем недостатком, что в этой области токов не создает необходимой индукции магнитного поля (см. зависимость электродинамической силы от тока — кривая *4* рис.5). В результате гашение дуги получается малоэффективным. На рис.5 изображена зависимость длительности горения дуги и электродинамической силы, действующей на нее, от тока для контактора на 150 А. Кривые времени дуги *1* — при отсутствии магнитного дутья; *2*— при магнитной системе с катушкой тока. В последнем случае при токе 10 А длительность горения дуги достигает 0,09 с. Такая длительность горения дуги недопустима, так как возможно устойчивое горение без погасания.

Согласно опытным данным ток, надежно отключаемый контакторами с катушкой тока, составляет 20—25% номинального тока аппарата.

Для надежного и быстрого гашения дуги в области малых токов применяются контакторы на небольшой ток (блок-контакторы) со сменными катушками магнитного дутья. Эти катушки имеют номинальный ток 1,5—40 А. При малом отключаемом токе устанавливается катушка, имеющая большое число витков, благодаря чему создается необходимое магнитное поле для гашения дуги за малое время.

Необходимо отметить, что за счет сильного магнитного дутья возможен резкий обрыв тока, что приводит к возникновению перенапряжений в сильно индуктивной цепи. Предельный ток, который может отключать блок-контактор, не должен превышать трехкратного значения номинального тока катушки магнитного дутья.

Достоинствами системы с катушкой тока являются:

1. Система хорошо работает в области токов свыше 100 А. При этих токах магнитное поле быстро сдувает дугу с рабочих поверхностей контактов и обеспечивает малый их износ.

2. Работа системы не зависит от направления тока. При изменении направления тока меняет знак и магнитное поле. Сила, действующая на дугу, не изменяет своего направления.

3. Поскольку через катушку проходит номинальный ток контактора, она выполняется из провода большого сечения. Такая катушка механически прочна и не боится ударов, возникающих при работе контактора. Падение напряжения на

катушке составляет доли вольта. Поэтому к изоляции катушки не предъявляются высокие требования.

Наряду с достоинствами эта система имеет и ряд недостатков:

1. Плохое гашение дуги при малых токах (5—7 А).
2. Большая затрата меди на катушку.
3. Нагрев контактов за счет тепла, выделяемого дугогасительной катушкой.

Несмотря на эти недостатки, благодаря высокой надежности при гашении номинальных и больших токов система с катушкой тока получила преимущественное распространение.

В параллельной системе катушка магнитного дутья подключается к независимому источнику питания. Магнитная индукция, создаваемая системой, постоянна и не зависит от отключаемого тока.

Сила, действующая на дугу согласно (**), пропорциональна отключаемому току

$$F_2=k_2I$$

На рис.5 изображена эта зависимость (кривая *5*) для случая, когда м. д. с. катушки тока при номинальном токе равна м. д. с. катушки напряжения. При токах от 0 до $I_н$ сила, действующая на дугу, при катушке напряжения получается большей, чем при катушке тока, — прямая *5* идет выше параболы *4*. Это позволяет резко снизить длительность горения дуги в области малых токов. При токах, больших $I_н$, сила, действующая на дугу, при катушке тока больше, чем при катушке напряжения. Однако для гашения это не имеет существенного значения, так как решающими являются силы, возникающие в самом контуре дуги.

Зависимость времени гашения дуги от тока для системы с катушкой напряжения приведена на рис.5 (кривая *3)*.

Поскольку в области малых токов катушка напряжения действует более эффективно, чем катушка тока, при одной и той же длительности горения дуги требуется меньшая м. д. с., что дает экономию. Однако катушки напряжения имеют и ряд существенных недостатков:

1. Направление электродинамической силы, действующей на дугу, зависит от полярности тока. При изменении направления тока дуга меняет направление своего движения. Контактор не может работать при перемене полярности тока.

2.Поскольку, к катушке прикладывается напряжение источника питания, изоляция должна быть рассчитана на это напряжение. Катушка выполняется из тонкого провода. Близость дуги к такой катушке делает ее работу ненадежной (расплавленный металл контактов может попадать на катушку).

3. При коротких замыканиях возможно снижение напряжения на источнике, питающем катушку. В результате процесс гашения дуги идет неэффективно.

В связи с указанными недостатками системы с катушкой напряжения в настоящее время применяются только в случаях, когда необходимо отключать небольшие токи — от 5 до 10 А. В аппаратах на большие силы тока эта система не применяется.

Система с постоянным магнитом по существу мало отличается по своей характеристике от системы с катушкой напряжения. Магнитное поле создается за

счет постоянного магнита. По сравнению с системами, где поле создается обмотками, постоянный магнит имеет ряд преимуществ:

1. Нет затраты энергии на создание магнитного поля;
2. Резко сокращается расход меди на контактор;
3. Отсутствует подогрев контактов от катушки, как это имеет место в системе с катушкой тока;
4. По сравнению с системой с катушкой напряжения система с постоянным магнитом

обладает высокой надежностью и хорошо работает при любых токах.

В силу своих преимуществ эта система, очевидно, в дальнейшем будет широко использоваться. Магнитное поле, действующее на дугу, создает силу, которая перемещает дугу в дугогасительную камеру. Назначение камеры — локализовать область, занятую раскаленными газами дуги, препятствовать перекрытию между соседними полюсами. При соприкосновении дуги со стенками камеры происходит интенсивное охлаждение дуги, что приводит к подъему вольт-амперной характеристики и успешному гашению. Исследования О. Б. Брона показали, что в качестве материала необходимо применять дугостойкую керамику.

Наиболее совершенной является лабиринтно-щелевая камера. Под действием магнитного поля дуга загоняется в суживающуюся зигзагообразную щель (рис.6,б). Благодаря увеличению длины дуги и хорошему тепловому контакту дуги со стенками камеры происходит ее эффективное гашение. По сравнению с обычной продольной щелью (рис.6, а) зигзагообразная щель уменьшает количество выброшенных из камеры раскаленных газов и, следовательно, зону выхлопа.

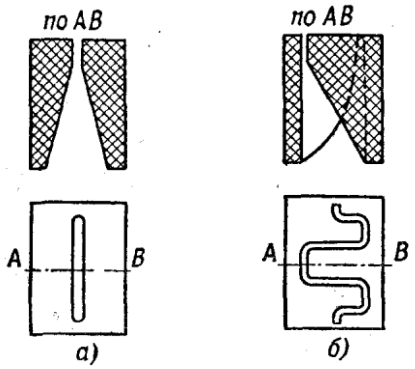


Рис.6. Дугогасительные камеры контакторов постоянного тока.

Электромагнитная система. Электромагнитная система обеспечивает дистанционное управление контактором, т.е. включение и отключение. В контакторах с приводом на постоянном токе преимущественное распространение получили электромагниты клапанного типа.

С целью повышения механической износостойкости в современных контакторах применяется вращение якоря на призме. Выбранная компоновка электромагнита и контактной системы (рис.1), применение специальной пружины 16, прижимающей якорь к призме, позволяют повысить износостойкость узла

вращения у контакторов КПВ-600 до $20*10^6$. По мере износа призменного узла зазор между скобой якоря и опорной призмой автоматически выбирается. В случае же применения подшипникового соединения якоря и магнитопровода при износе подшипника возникают люфты, нарушающие нормальную работу аппарата.

Для получения вибро- и ударостойкости подвижная система контактора должна быть уравновешена относительно оси вращения. Типичным примером является электромагнит контактора серии КПВ-600 (рис.1). Якорь магнита уравновешивается хвостом, на котором укрепляется подвижный контакт. Возвратная пружина также действует на хвост якоря. Катушка электромагнита наматывается на тонкостенную изолированную стальную гильзу. Такая конструкция катушки обеспечивает хорошую прочность и улучшает тепловой контакт катушки с сердечником. Последнее способствует снижению температуры катушки и уменьшению габарита контактора.

При включении электромагнит преодолевает действие силы возвратной и контактной пружин. Тяговая характеристика электромагнита должна во всех точках идти выше характеристики противодействующих пружин при минимальном допустимом напряжении на катушке (0,85 $U_н$) и нагретой катушке. Включение должно происходить при всё время нарастающей скорости. Не должно быть замедления в момент, замыкания главных контактов.

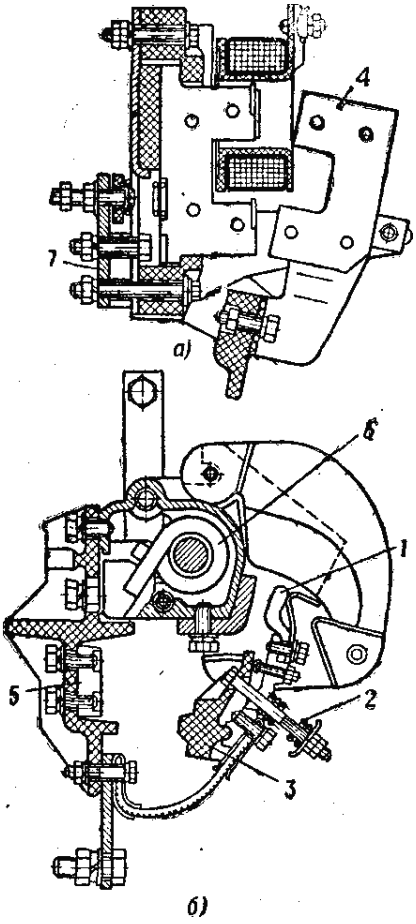
Наиболее тяжелым моментом при включении является преодоление силы в момент касания главных контактов, так как электромагнит должен развивать значительное усилие при большом рабочем зазоре. Важным параметром механизма является коэффициент возврата $k_В = U_{отн}/U_{ср}$. Для контакторов постоянного тока $k_В$, как правило, мал (0,2—0,3), что не позволяет использовать контактор для защиты двигателя от снижения напряжения.

Наибольшее напряжение на катушке не должно превышать 110% $U_н$, так как при большем напряжении увеличивается износ из-за усиления ударов якоря, а температура обмотки может превысить допустимую величину.

Следует отметить, что с целью уменьшения м. д. с. обмотки, а, следовательно, и потребляемой ею мощности рабочий ход якоря выбирается небольшим (8—10) 10^{-3}м. В связи с тем, что для надежного гашения дуги при малых токах требуется раствор контактов (17—20)10^{-3} м, расстояние точки касания подвижного контакта от оси вращения подвижной системы берется в 1,5—2 раза больше, чем расстояние от оси полюса до оси вращения.

ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ КОНТАКТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

1Коммутирующее устройство. Контакторы переменного тока выпускаются на токи от 100 до 630 А. Число главных контактов колеблется от одного до пяти. Это отражается на конструкции всего аппарата в целом. Наиболее широко распространены контакторы трехполюсного исполнения. Наличие большого числа контактов приводит к увеличению усилия и соответственно момента, необходимых для включения аппарата.



На рис.8, *а* представлен разрез контактора КТ-6000 по магнитной системе, а на рис.8, б — по контактной и дугогасительной системам одного полюса. Подвижный контакт *1* с пружиной *2* укреплен на изоляционном рычаге *3*, связанном с валом контактора. Вследствие более легкого гашения дуги переменного тока раствор контактов может быть взят небольшим. Уменьшение раствора дает возможность приблизить контакт к оси вращения. Малое расстояние точки касания контактов от оси вращения позволяет уменьшить силу электромагнита, необходимую для включения контактора, что дает возможность уменьшить габариты и потребляемую мощность магнита.

Подвижный контакт *1* и якорь *4* электромагнита связаны между собой через вал контактора. В отличие от контакторов постоянного тока подвижный контакт в контакторе КТ-6000 не имеет перекатывания. Отключение аппарата происходит под действием контактных пружин и сил веса подвижных частей.

Для удобства эксплуатации подвижный и неподвижный контакты сделаны легко сменными. Контактная пружина *2*, так же как и в контакторах постоянного тока, имеет предварительное нажатие, составляющее примерно половину конечного.

Рис.8. Контактор переменного тока серии КТ-6000.

Магнитная и контактная системы контактора КТ-6000 укреплены на стальной рейке *5*, что позволяет использовать их в реечной конструкции комплектных станций управления.

Широкое распространение получила мостиковая контактная система с двумя разрывами на каждый полюс (рис.9). Такая конструкция распространена в пускателях. Быстрое гашение дуги, отсутствие гибкой связи являются большим преимуществом такой конструкции.

Применяется как прямоходовая система (рис.13), так и с вращением якоря (рис.9). В первом случае якорь движется поступательно. Подвижные контакты связаны с якорем и совершают тот же путь, что и якорь. При передаче усилия контактных пружин к якорю из-за отсутствия рычажной системы нет выигрыша в силе. Электромагнит должен развивать усилие большее, чем сумма сил контактных пружин и веса якоря (в контакторах с вертикальной установкой).

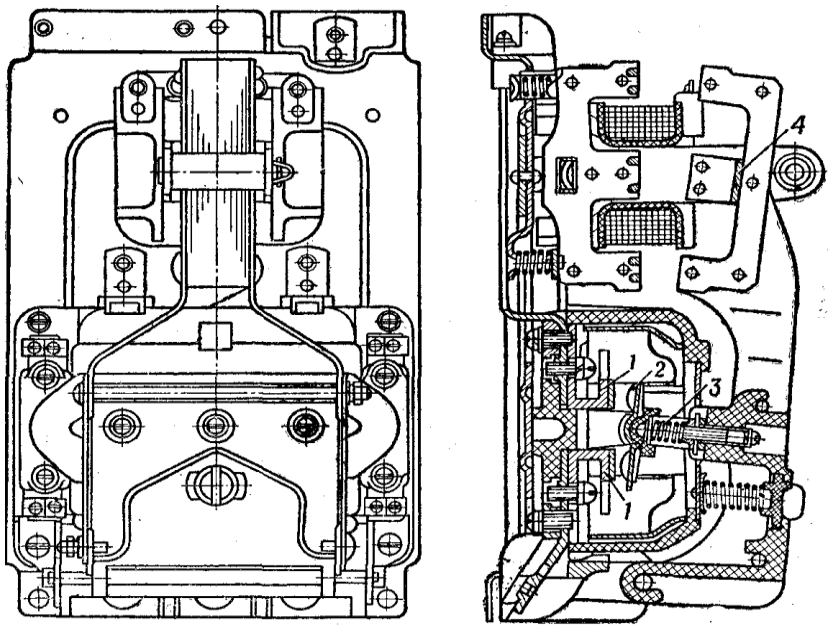


Рис.9. Контактор пускателя серии ПА.

В большинстве выполненных по этой схеме контакторов наблюдается медленное нарастание силы контактного нажатия, из-за чего имеет место длительная вибрация контактов (до 10 мс). В результате происходит сильный износ контактов при включении. Поэтому такая конструкция применяется только при небольших номинальных токах. Более совершенным является контактор, который имеет мостиковую систему и рычажную передачу усилий от контактов к якорю электромагнита. Разрез такого контактора на ток 60 А показан на рис.9. Каждый полюс имеет два неподвижных контакта *1* и один мостиковый контакт *2*. Места касания контактов облицованы металлокерамическим материалом (серебро—окись кадмия). Нажатие контактов создается пружиной *3*. Контактный мост имеет малую массу и выполнен самоустанавливающимся.

Расстояние от оси вращения до места расположения контактов в 2,5 раза меньше, чем расстояние от оси вращения до точки крепления якоря *4*. Такая кинематика позволяет увеличить силу нажатия при данных габаритах электромагнита. Близкое расположение контактов к оси вращения снижает скорость движения контактов. Малая масса моста, низкая скорость в момент касания, большая сила нажатия способствуют резкому снижению вибрации (она длится всего 0,3 мс). При этом коммутационная износостойкость возрастает до $2*10^6$ операций включения и отключения.

В высокочастотных контакторах (500—10000 Гц) существенно возрастают потери в токоведущих частях из-за эффекта близости и поверхностного эффекта. Для эффективного отвода тепла целесообразно использование водяного охлаждения.

Гашение дуги в контакторах переменного тока.

Контактор имеет один разрыв на полюс и не снабжен никаким дугогасительным устройством.

В случае активной нагрузки (cosφ=1) гашение дуги происходит при растворе контактов примерно $0,5*10^{-3}$м при любом токе и любом напряжении (до 500В).

При индуктивной нагрузке (cosφ=0,2-0,5) такое же гашение имеет место при напряжении до 220В. Это объясняется тем, что гашение дуги происходит за счет практически мгновенного восстановления электрической прочности 200-220В около катода.

При напряжении источника питания, не превышающем 220В**,** для гашения дуги необходим всего один разрыв на полюс. Никаких дугогасительных устройств не нужно.

Если в цепи полюса аппарата создавать два разрыва, например, за счет применения мостикового контакта, то дуга надежно гасится за счет околоэлектродной прочности при напряжении сети 380 В. На основании этих данных в настоящее время широко применяются контакторы с двукратным разрывом цепи в одном полюсе. При индуктивной нагрузке (cosφ =0,2—0,5) и напряжении источника свыше 380В величина восстанавливающегося напряжения становится больше околокатодной прочности. В области до 40—50 А гашение происходит за счет механического растяжения дуги. Максимальный раствор, требуемый для гашения, составляет $7*10^{-3}$ м. При токах более 50 А необходимый раствор уменьшается. Гашение происходит за счет действия на дугу электродинамических сил. При токе более 200А гашение происходит при растворе менее 10^{-3} м. Таким образом, наиболее тяжелой для гашения является величина тока 40—50 А. Исследования показали, что увеличение раствора сверх $8*10^{-3}$ м не влияет на процесс гашения дуги.

Для эффективного гашения дуги, уменьшения износа контактов могут быть использованы следующие системы:

1. Магнитное гашение дуги с помощью катушки тока и дугогасительной камеры с продольной или лабиринтной щелью (рис.6).

2. Дугогасительная камера с деионной решеткой из стальных пластин.

В системе магнитного дутья с катушкой тока сила, действующая на дугу, пропорциональна квадрату тока. Поэтому и при переменном токе на дугу действует сила, неизменная по направлению. Сила пульсирует с двойной частотой во времени (так же, как электродинамическая сила, действующая на проводник). Средняя сила получается такой же, как и при постоянном токе, при условии, что постоянный ток равен действующему значению переменного тока. Указанные соотношения справедливы, когда потери в магнитной системе катушки дутья отсутствуют, и поток по фазе совпадает с током. Несмотря на эффективную работу этого устройства, в настоящее время оно применяется только в контакторах, работающих в тяжелом режиме (число включений в час более 600).

Довольно широкое распространение получила дугогасительная камера с деионной решеткой из стальных пластин. Принципиальная схема дугогасительного устройства дана на рис.11, *б.* Дуга *1,* возникающая после расхождения контактов, втягивается в клиновидный паз параллельно расположенных стальных пластин *2*. В верхней части дуга пересекается пластинами и разбивается на ряд коротких дуг 3. При вхождении дуги в решетку возникают силы, тормозящие движение дуги. Для уменьшения этих сил дуга, смещенная относительно середины решетки, вначале пересекает пластины с нечетными номерами, а потом уже с четными (рис.

11,6). После того как дуга втянется в решетку и разобьется на ряд коротких дуг, в цепи возникает дополнительное падение напряжения *А* на каждой паре электродов. Это падение напряжения составляет 20—30 В. Из-за наличия этого падения напряжения ток в цепи пройдет через нуль ранее своего естественного нулевого значения. При этом уменьшается восстанавливающееся напряжение промышленной частоты, а, следовательно, и пик восстанавливающегося напряжения (рис.11,а).

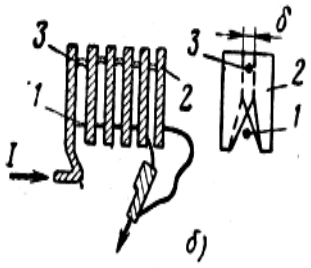


Рис.11. Процесс гашения дуги в деионной решётке.

Для того чтобы пластины решетки не подвергались коррозии, они покрываются тонким слоем меди или цинка. Несмотря на быстрое гашение дуги, при частых включениях и отключениях происходит нагрев пластин до очень высокой температуры. Возможно даже прогорание пластин. В связи с этим число включений и отключений в час у контакторов с деионной решеткой не превышает 600 (контактор КТ-7000).

В новых контакторах, применяемых в пускателях серии ПА, применяется двукратный разрыв на каждый полюс (рис.9). Для того чтобы уменьшить оплавление контактов, они охвачены стальной скобой. При образовании дуги на нее действует электродинамическая сила втягивания дуги в эту скобу. Движению опорных точек дуги по контакту помогают также электродинамические силы, возникающие за счет взаимодействия дуги с током в подводящих проводниках и арматуре контактов. Здесь, так же как и в решетке для гашения дуги, используется околокатодная прочность, возникающая после прохода тока через нуль. Два разрыва и магнитное дутье за счет стальной скобы и поля подводящих проводников обеспечивают надежную работу при напряжении до 500 В. Контактор на номинальный ток 60 А отключает десятикратный ток короткого замыкания при напряжении 450 В и cos φ=0,3.

Электромагнитный механизм контактора переменного тока. Для привода контактов широкое распространение получили электромагниты с Ш-образным и П-образным сердечниками.

Магнитопровод состоит из двух одинаковых частей, одна из которых укреплена неподвижно, другая связана через рычаги с контактной системой. В электромагнитах старой конструкции для устранения залипания якоря между средними полюсами Ш-образной системы делался зазор. При включении удар приходился на крайние полюсы, что приводило к их заметному расклепыванию. В случае перекоса якоря на рычаге возможно разрушение поверхности полюса сердечника острыми кромками якоря. В современных контакторах (серии ПА) для устранения залипания в цепь введена магнитная прокладка. Во включенном

положении все три зазора равны нулю. Это позволяет уменьшить износ полюсов, так как удар приходится на все три полюса. В современных контакторах для уменьшения удара неподвижный сердечник амортизирован с помощью цилиндрических пружин, что улучшает условия работы и контактной системы, поскольку при включении не возникает вибрации основания контактора.

С целью устранения вибрации якоря во включенном положении на полюсах магнитной системы устанавливаются короткозамкнутые витки. Действие короткозамкнутого витка наиболее эффективно при малом воздушном зазоре. Поэтому для плотного прилегания полюсов их поверхность должна шлифоваться. Хорошие результаты по уменьшению вибрации электромагнита достигнуты в контакторе типа ПА, где за счет эластичного крепления сердечника возможна самоустановка якоря относительно сердечника, при которой воздушный зазор получается минимальным.

В особо тяжелых условиях работают электромагниты контакторов при пятиполюсном исполнении. Для того чтобы обеспечить нормальную работу пяти контактных пар, электромагнит имеет форсировку. Такой контактор может работать только в повторно-кратковременном режиме.

Электромагниты контакторов переменного тока могут также питаться от сети постоянного тока. В этом случае на контакторах устанавливается специальная катушка, которая работает с форсировочным сопротивлением. Форсировочное сопротивление шунтировано размыкающим блок-контактом контактора или более мощными контактами другого аппарата.

Электромагниты контакторов обеспечивают надежную работу в диапазоне колебания питающего напряжения 85—110% $U_н$. Поскольку катушка контактора питается через замыкающий блок-контакт, то включение контактора не происходит самостоятельно после подъема напряжения до номинального значения. Так же как и контакторы постоянного тока, контакторы переменного тока имеют блок-контакты, которые приводятся в действие тем же электромагнитом, что и главные контакты.

УСТРОЙСТВО МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

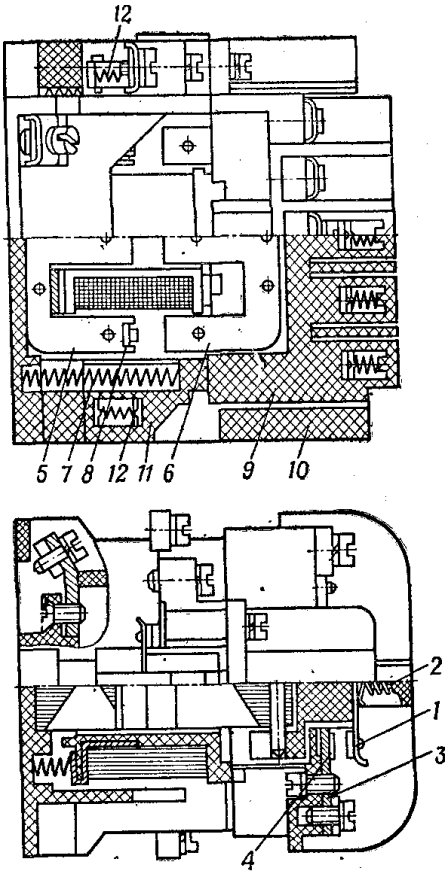
Магнитным пускателем называется контактор, предназначенный для пуска в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Конструкция и схема включения пускателя.

Наибольшее распространение получили пускатели серий ПМЕ и ПА. На рис.13 представлен магнитный пускатель серии ПМЕ.

Учитывая облегченные условия работы пускателя при отключении, возможно, используя двукратный разрыв цепи, отказаться от применения громоздких дугогасительных устройств в виде решетки или камеры магнитного дутья. Широко применяются торцевые контакты с металлокерамикой. Подвижный контакт *1* выполняется мостикового типа с самоустанавливанием. Токоведущие шинки *3* от зажимов к неподвижным контактам *4* выполняются таким образом, чтобы электродинамические силы сдували дугу с контактов.

Прямоходовой электромагнит имеет Ш-образный сердечник *5* и якорь *6*. Возврат пускателя в исходное положение происходит за счет пружины *7*. Короткозамкнутый виток *8* расположен на двух крайних стержнях сердечника. Якорь электромагнита *6* связан с изоляционной траверсой *9*, несущей подвижные контакты *1* с контактными пружинами *2*. Траверса *9* движется в направляющих *10*, являющихся частью литого корпуса *11*. Пускатель может иметь пять главных и два вспомогательных контакта *12*. Основной особенностью электромагнитного механизма является равенство ходов контакта и якоря электромагнита. Такая система имеет ряд недостатков, которые ведут к большому времени вибрации контактов (более 1 мс) и их быстрому износу. В современных пускателях такая система применяется только при малых мощностях двигателей (номинальный ток 25 А).



При токах, больших 25 А, хорошо себя зарекомендовала система пускателей серии ПА, в которой ход контакта примерно в 2,5 раза меньше, чем ход якоря электромагнита. Для защиты двигателя от перегрузки в двух фазах устанавливаются тепловые реле. В некоторых типах пускателей,например в серии П, тепловые реле расположены на одной панели с контактором. Реле типа ТРП и ТРН монтируются вне контактора пускателя.

Рис.13. Пускатель серии ПМЕ

Схема включения нереверсивного пускателя показана на рис14. Главные (линейные) контакты *Л* включаются в рассечку проводов, питающих двигатель. В проводах двух фаз включаются также нагревательные элементы тепловых реле $ТРП_1$ и $ТРП_2$. Катушка электромагнита *К* подключается к сети через размыкающие контакты тепловых реле *Т*° и кнопки управления. При нажатии кнопки *Пуск* напряжение на катушку подается через замкнутые контакты *1—2* кнопки *Стоп* и замкнутые контакты тепловых реле *Т*°. После притяжения якоря электромагнита замыкается блок-контакт *БК,* шунтирующий контакты *3—4* кнопки *Пуск*. Это дает возможность отпустить пусковую кнопку. Для отключения пускателя нажимается кнопка *Стоп*. При перегрузке двигателя срабатывают тепловые реле, которые разрывают цепь катушки *К*. Якорь электромагнита отпадает. Происходит отключение пускателя.

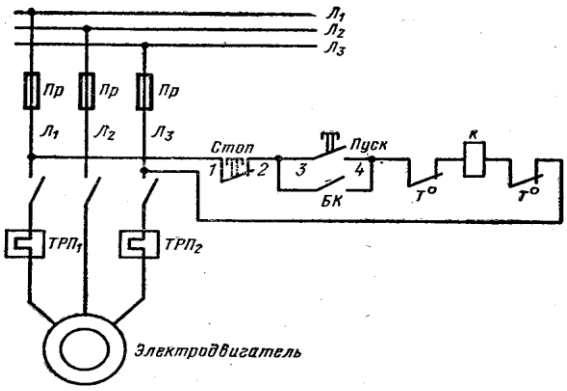
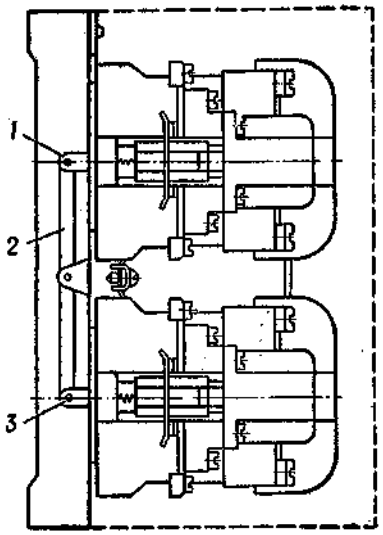


Рис.14. Схема включения нереверсивного пускателя.

На рис.15 показан общий вид реверсивного пускателя на базе ПМЕ. Подвижная часть верхнего пускателя *1* с помощью рычага *2* сблокирована с подвижной частью *3* нижнего пускателя. При подаче напряжения на верхний пускатель его якорь притягивается, верхний конец рычага *2* поворачивается влево и удерживает якорь нижнего пускателя в крайнем правом положении. Даже при подаче напряжения на нижний пускатель якорь его электромагнита не сдвинется с места, так как сила, действующая на верхнее плечо (якорь верхнего пускателя притянут), больше силы, действующей на нижнее плечо. Поскольку при подаче напряжения на нижний электромагнит в его обмотке протекает большой ток и она может выйти из строя, механическая блокировка дополняется электрической.



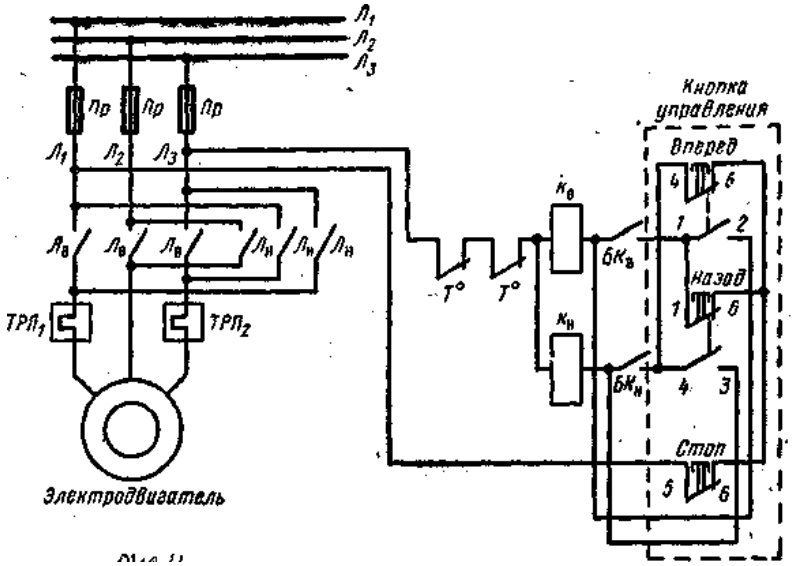


Рис.15. Механическая блокировка реверсивного пускателя.

Рис.16. Схема включения реверсивного пускателя.

Схема включения реверсивного пускателя приведена на рис16. Кнопка управления *Вперед* имеет замыкающие контакты *1—2* и размыкающие контакты *4—6*. Аналогичные контакты имеет кнопка пуска двигателя в обратном направлении *Назад.*

Соответственно индекс «в» отнесен к элементам, участвующим при работе вперед, и индекс «н» — при работе назад. При пуске *Вперед* замыкаются контакты

1—2 этой кнопки и процесс протекает так же, как и у нереверсивного пускателя, с той лишь разницей, что цепь катушки $K_н$ замыкается через размыкающие контакты *1—6* кнопки *Назад*. Одновременно размыкаются размыкающие контакты *4—6* кнопки *Вперед*, при этом разрывается цепь катушки $K_н$. При нажатии кнопки *Назад* вначале размыкаются контакты *1—6,* обесточивается катушка $K_В$ и отключается пускатель *Вперед*. Затем контактами *4—3* запускается электромагнит пускателя *Назад.* При одновременном нажатии кнопок *Вперед* и *Назад* ни один из пускателей не будет включен.