

И. С. Таев

Электрические аппараты управления

*Издание второе,
переработанное и дополненное*

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
„Электрические аппараты“



Москва „Высшая школа“ 1984

ББК 31.264
Т-13
УДК 621.316.36 (075)

Рецензенты:

Кафедра электрических аппаратов Ленинградского политехнического института (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *Г. Н. Александров*); д-р техн. наук, проф. *Д. В. Орлов* (Ивановский энергетический институт)

Таев И. С.

Т-13 Электрические аппараты управления: Учебник для вузов по спец. „Электрические аппараты“. 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1984. — 247 с., ил.
В пер.: 1 р.

В учебнике описаны устройство, теория, методы расчета и проектирования; приведены основные технические параметры и характеристики электрических аппаратов управления электрооборудованием и электрических аппаратов распределительных устройств низкого напряжения (до 1140 В) — командоаппараты, реле управления, электромагнитные муфты, контакторы, пускатели, автоматические выключатели и предохранители. Рассмотрены особенности и условия работы описываемых аппаратов.

Т 2302030000 — 390
001 (01) — 84 120 — 84

ББК 31.264
6П2.1.082

Широкая программа развития средств электрификации и автоматизации, успешно выполняемая в нашей стране в соответствии с решениями XXVI съезда КПСС, определяет непрерывный и интенсивный прогресс в области отечественного электроаппаратостроения. Электрические аппараты, являющиеся одним из основных средств автоматизации и электрификации, развиваются очень интенсивно. Еще в годы создания социалистической индустрии *В. И. Ленин* писал, что электрическая промышленность имеет гигантское значение. Электроаппаратостроение получило в советское время большое развитие. Объем выпуска аппаратов низкого напряжения возрастает у нас за каждое десятилетие на 60 — 80%. Огромную работу в этом направлении ведут научно-исследовательские институты Министерства электротехнической промышленности СССР и прежде всего ВНИИэлектроаппарат (г. Харьков) и ВНИИРелестроения (г. Чебоксары). Большой вклад в развитие низковольтного электроаппаратостроения внесли советские ученые — проф., д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР *О. Б. Брон*, д-р техн. наук *Р. С. Кузнецов*, проф., д-р техн. наук *В. Т. Омельченко*, проф., д-р техн. наук *К. К. Намитоков* и др.

Интенсивное развитие электроаппаратостроения привело к созданию принципиально новых видов аппаратов. В настоящее время наряду с контактными аппаратами широко применяются бесконтактные аппараты управления. В результате этого созданы современные комплектные полупроводниковые аппараты, осуществляющие функции коммутации, автоматического регулирования и защиты электрооборудования. В совершенствовании аппаратов управления большое значение имеет плодотворное сотрудничество специалистов в рамках содружества стран СЭВ.

В настоящей книге, являющейся учебником по курсу „Электрические аппараты управления“, изложены вопросы, относящиеся к наиболее распространенному виду аппаратов — электрическим аппаратам, работающим в сетях низкого напряжения (до 1140 В).

Первое издание этой книги в качестве учебного пособия вышло в 1969 г. С тех пор аппараты управления получили существенное развитие. Появилось много новых видов этих аппаратов, основанных на новых принципах действия. Качественно улучшены конструкции и технико-экономические показатели аппаратов, основанных на традиционных принципах. Получены новые оригинальные результаты теоретических и опытных исследований, а также разработаны усовершенствованные методики

расчета этих аппаратов на основе применения ЭВМ. Все это нашло отражение в настоящем учебнике, материал которого полностью переработан и обновлен по сравнению с первым его изданием.

Учебник написан по курсу „Электрические аппараты управления“, входящему в учебные планы специальности 0605 „Электрические аппараты“. В его основу положено содержание лекций по одноименному курсу, которые автор читает в Московском энергетическом институте. Учебник может быть использован студентами специальностей 0601, 0602, 0603, 0613, 0618, 0628, 0634, 0636, 0638, 0639 и других при изучении курсов электрических аппаратов управления, а также автоматизации и технических средств автоматизации.

В процессе работы над рукописью этого издания с благодарностью учтены ценные замечания, отмеченные в рецензии кафедры электрических аппаратов Ленинградского политехнического института, руководимой проф., д-ром техн. наук *Г. Н. Александровым*, а также в рецензии д-ра техн. наук *Д. В. Орлова*.

Отзывы и пожелания, направленные на улучшение этого издания, следует направлять в издательство „Высшая школа“ по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Автор

Электрические аппараты подразделяются на два вида — аппараты высокого напряжения и аппараты низкого напряжения. Аппараты высокого напряжения работают в сетях, номинальные напряжения которых равны или превышают 3000 В. Аппараты низкого напряжения предназначены для работы в установках со следующими номинальными напряжениями источника (ГОСТ 721 — 77): постоянный ток — 110, 220, 440 В; переменный ток трехфазный — 36, 220, 380, 660, 1140 В.

Предпочтительные значения номинальных токов электрических аппаратов таковы: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000 и 6300 А (ГОСТ 6827 — 76). Большое отличие величин номинальных напряжений (а иногда и токов) определяет значительное различие между аппаратами высокого и низкого напряжений в их конструктивном оформлении, габаритах, технико-экономических показателях и условиях эксплуатации.

Среди аппаратов низкого напряжения существует несколько обособленных разновидностей:

а) *автоматические регуляторы*, предназначенные для поддержания заданного значения определенной физической величины (напряжения, тока, температуры, скорости и др.) на объекте регулирования;

б) *реле и электромеханические преобразователи автоматики*, для которых характерны функции контроля, распределения и хранения сигналов, их преобразования и т. п.;

в) *статические преобразователи* тока, частоты, формы импульсов; вторичные источники питания разных видов;

г) *аппараты управления* режимом работы электрооборудования;

д) *аппараты, устанавливаемые в распределительных устройствах* низковольтных сетей и установок и управляющие режимом их работы.

Ниже рассматриваются последние два вида аппаратов низкого напряжения, имеющие много общего в принципах действия, конструктивном оформлении узлов, выполняемых функциях, а также в технических характеристиках и параметрах. Поэтому они условно объединены под общим названием „Электрические аппараты управления“.

Под электрическими аппаратами управления будем понимать аппараты, осуществляющие управление режимом работы электрооборудования промышленных предприятий, а так-

же управление режимом работы распределительных сетей низкого напряжения.

Аппараты управления режимом работы электрооборудования, обычно называемые аппаратами управления, включают в себя контакторы, пускатели, контроллеры, путевые выключатели и переключатели, командоаппараты, реле управления и др. Перечисленные аппараты коммутируют электрические цепи разнообразных производственных установок, осуществляют пуск, торможение, реверсирование и изменение частоты вращения электрических машин, обеспечивают автоматическое и неавтоматическое управление режимами работы разнообразного электрооборудования и технологическими процессами.

Аппараты управления режимом работы распределительных сетей, обычно называемые аппаратами распределительных устройств низкого напряжения, включают в себя предохранители, автоматические воздушные выключатели (автоматы) и др. Эти аппараты предназначены для автоматического отключения отдельных участков электрических сетей при возникновении в них аварийных режимов (токи короткого замыкания, перегрузки, понижение или повышение напряжения по сравнению с номинальным), а также для коммутации тока в сетях по команде оператора.

В настоящее время существуют и успешно развиваются *контактные и бесконтактные (полупроводниковые) аппараты управления*. Их характеристики даны ниже в табл. 3-8. Нашли применение тиристорные пускатели и полупроводниковые расцепители автоматических выключателей. Сравнение, приведенное в табл. 3-8, показывает, что для одних условий предпочтительны контактные аппараты, для других — бесконтактные. Бесконтактные аппараты нашли преимущественное применение в установках с плавным управлением током, например в регулируемых приводах, в быстродействующих устройствах, при относительно небольших токах и напряжениях. Контактные аппараты предпочтительнее для осуществления простой коммутации (включение и отключение) особенно при высоких значениях тока и напряжения. Бесконтактные аппараты применяются в основном в регулируемых приводах (например, с регулированием частоты вращения двигателей); количество этих приводов в сравнении с нерегулируемыми относительно невелико (около 10%).

В аппаратах управления в качестве контактных и токоведущих материалов очень широко применяются серебро и медь или материалы на их основе. Разведанные в мире запасы серебра обеспечат потребности примерно на 15 лет, а меди — на 30 лет. Поэтому остро встает вопрос об экономии этих материалов и их замене. Существенная экономия серебра в аппаратах возможна путем ограничения или исключения электрической дуги при коммутации тока (дуга выжигает контакты) и повышения их электрической износостойкости до уровня механической износостойкости аппаратов. Замена медных токоведущих

частей аппаратов на алюминиевые требует прежде всего создания надежных болтовых контактных соединений алюминиевых токоведущих элементов (плакирование поверхностей медью, нанесение металлических покрытий на них, разработка специальных конструкций контактных соединений с неизменным усилием нажатия, которое может недопустимо снижаться в результате температурных напряжений в контактах).

Применение жидких металлов (галлий, его сплав с индием и оловом и др.) в качестве контактных элементов позволяет устранить их электрический износ и не требует создания обычной для контактных аппаратов силы нажатия в контактах. Эти аппараты найдут широкое применение, если разработать практически приемлемый (например, электромагнитный) способ управления положениями жидкометаллического элемента в аппарате, соответствующими его включенному и отключенному состояниям, разработать методы борьбы с его химической активностью при контакте с металлом и воздухом, а также методы борьбы с электродинамическим отбросом подвижного жидкометаллического элемента при протекании токов короткого замыкания.

Разработка и усовершенствование аппаратов управления в промышленности ведется сейчас в направлении уменьшения их габаритов и металлоемкости. Для реле-контакторов на 380 В уже достигнуты удельные объемы 0,4 см³ на 1 А суммарного (для трех полюсов) номинального тока. Уменьшению объемов способствует применение высококачественных изоляционных материалов, например, прессованных полиэфирных термопластиков. Модульность конструкций аппаратов, упрощение их монтажа, снижение трудоемкости и затрат на эксплуатацию — это также одни из основных направлений в развитии аппаратов управления. Усовершенствование технологии производства аппаратов и прежде всего автоматизация слесарно-сборочных и контрольно-измерительных операций, где доля ручного труда наибольшая, — это важный резерв электроаппаратных производств, позволяющий снизить трудоемкость в несколько раз.

Глава 1

ВИДЫ АППАРАТОВ УПРАВЛЕНИЯ, УСЛОВИЯ ИХ РАБОТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА

§ 1-1. ВИДЫ АППАРАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Рассмотрим несколько типичных схем управления электродвигателями, основанных на применении контактных электрических аппаратов. Пример электрической схемы управления асин-

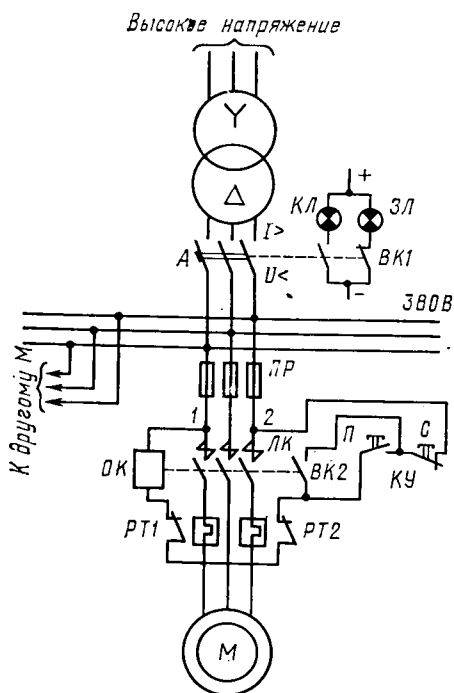


Рис. 1-1. Схема управления и защиты асинхронного двигателя

хронным двигателем с короткозамкнутым ротором и его защиты от токов короткого замыкания и токов перегрузки дан на рис. 1-1. Схема питается от трансформатора 7. Функции основного силового коммутационного аппарата выполняет контактор или пускатель. *Контактор* — это аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для многократных включений и отключений электрической цепи при токах нагрузки, не превышающих номинальный, а также для редких отключений при токах перегрузки (обычно 7—10-кратные по отношению к номинальному). Род коммутируемого тока определяет некоторые конструктивные особенности контакторов. Поэтому контакторы переменного и постоянного токов обычно не взаимозаменяемые, хотя практически имеются контакторы, совмещающие в

себе возможности коммутации как постоянного, так и переменного тока.

Пускатель — аппарат, предназначенный только для включения и отключения двигателей. В него нередко встраиваются

элементы, осуществляющие тепловую защиту двигателя от перегрева токами перегрузки.

Пуск и останов двигателя *М* (рис. 1-1) осуществляются с помощью контактора, главные контакты которого обозначены *ЛК*, а включающая обмотка — *ОК*. Кнопка управления *КУ* является разновидностью так называемых *командоаппаратов*, предназначенных для коммутации тока в цепях управления — обычно в цепях обмоток электрических аппаратов или элементов автоматики. К командоаппаратам относятся, например, командоконтроллеры, имеющие сравнительно большое количество контактов, замыкаемых и размыкаемых в определенной последовательности при повороте приводного вала. Командоконтроллеры применяются в более сложных схемах управления двигателями, когда при повороте вала подается не одна, а ряд команд в схему управления.

Пуск двигателя *М* осуществляется нажатием кнопки *П*, после чего обмотка *ОК* контактора оказывается под напряжением (цепь тока от фазы *1* к фазе *2* замыкается через обмотку *ОК*, размыкаемые контакты тепловых реле *РТ1* и *РТ2*, замыкаемую кнопку *П* и размыкаемую кнопку *С*). Под действием электромагнитной силы, развиваемой электромагнитом обмотки *ОК*, контактор включается и его замыкаемые главные линейные контакты *ЛК* подают напряжение (и ток) к двигателю, который начинает вращаться. Когда оператор отпускает кнопку *П* и ее контакты размыкаются, обмотка *ОК* остается под напряжением, так как кнопка *П* шунтируется замыкаемыми *вспомогательными контактами* *ВК2*, которые связаны с подвижной системой контактора и замыкаются при его срабатывании. Для отключения контактора (и останова двигателя) нажимают кнопку *С*, которая своими контактами разрывает цепь тока через обмотку *ОК*. Под действием возвратной пружины контактор отключается. Вспомогательные контакты *ВК2*, связанные с подвижной системой контактора, размыкаются и после возврата кнопки *С* в исходное положение цепь тока через обмотку *ОК* остается также разорванной.

В цепи двигателя *М* установлены два вида *защитных аппаратов* — плавкие предохранители *ПР* и тепловые реле *РТ1* и *РТ2*. *Плавкие предохранители* отключают цепь при возникновении в ней короткого замыкания. При прохождении сверхтока перегорают металлические плавкие вставки предохранителя и гасится возникающая электрическая дуга. *Тепловые реле* срабатывают при прохождении по цепи тока перегрузки (7 — 18-кратного по отношению к номинальному). Этот ток нагревает специальные биметаллические элементы тепловых реле, они деформируются и отключают размыкаемые контакты *РТ1* и *РТ2*. Цепь тока через обмотку *ОК* контактора прерывается, контактор отключает двигатель. При самовозврате контактов *РТ1* и *РТ2* в замкнутое состояние контактор не включается, так как цепь обмотки разрывается вспомогательными контактами *ВК2*.

В схеме имеется *автоматический воздушный выключатель* (автомат) *А* — защитный электрический аппарат, автоматически отключающий электрическую цепь при возникновении аварийных режимов (короткое замыкание, понижение напряжения, перегрузка). Автомат используется также для редких коммутаций электрических цепей в нормальных условиях. На рис. 1-1 $I >$ означает, что автомат *А* имеет максимальную токовую защиту (от тока короткого замыкания), а индекс $U <$ показывает, что автомат имеет защиту от понижения напряжения. Обычно автомат защищает не единичный объект, а ряд параллельно включенных объектов. Он работает селективно (избирательно) с другими защитными аппаратами. Так, при возникновении короткого замыкания на зажимах двигателя срабатывают и отключают цепь предохранители *ПР*. Если эти предохранители не срабатывают и не отключают своевременно цепь с током короткого замыкания, должен сработать автомат *А*. Для обеспечения селективной защиты создается так называемая ступень селективности по времени: при данном токе время срабатывания автомата *А* должно быть больше времени срабатывания предохранителя *ПР*. Автоматы рассчитываются на отключение очень больших токов, достигающих десятков и даже сотен килоампер. Применяются автоматы и на другие, существенно меньшие значения предельных отключаемых токов. Вспомогательные контакты *ВК1* жестко связаны с подвижной системой автомата *А*. Они применены для сигнализации положения автомата. В отключенном состоянии автомата размыкаемые контакты замыкают цепь зеленой лампы *ЗЛ*, во включенном состоянии — цепь красной лампы *КЛ*.

Тепловые реле *РТ1* и *РТ2* осуществляют функции защиты двигателя от токов перегрузки и непосредственно реагируют на температуру нагрева элемента, обтекаемого током защищаемой цепи. Их часто встраивают в пускатель. Кроме тепловых реле к *реле управления* относятся также реле тока, напряжения, времени, промежуточное реле и др. В отличие от защитных реле, срабатывающих при возникновении аварийного режима в цепях и подающих сигнал на отключение силовой цепи соответствующим выключателям, реле управления выполняют функции управления режимом работы установки в нормальных условиях. Для иллюстрации функций, выполняемых некоторыми реле управления, на рис. 1-2 показана схема пуска асинхронного двигателя с контактными кольцами по принципу тока. Пуск схемы осуществляется нажатием кнопки *П*, останов двигателя — нажатием кнопки *С* (стоп).

В цепь ротора включаются блоки резисторов *Р1*, *Р2*, которые на определенных этапах пускового периода ограничивают величину тока в роторе. Блоки пусковых резисторов в цепи ротора автоматически закорачиваются, когда ток в роторе снижается до заданной величины. При нажатии пусковой кнопки *П* обмотка контактора *ЛК* оказывается под напряжением, контактор включается и подает напряжение на статор асинхронного

двигателя *М*. Вспомогательные контакты контактора *ВК* шунтируют пусковую кнопку *П*. Появившийся в роторе ток протекает через резисторы *Р1* и *Р2*, обмотки токовых реле *РТ1* и *РТ2*. Токковые реле срабатывают лишь при определенном значении тока, превышающем заданный ток трогания, и отпускают (приходят в исходное положение) при токах, меньших значений тока отпущения (возврата). В этих реле предусматривается возможность регулирования токов срабатывания и отпущения.

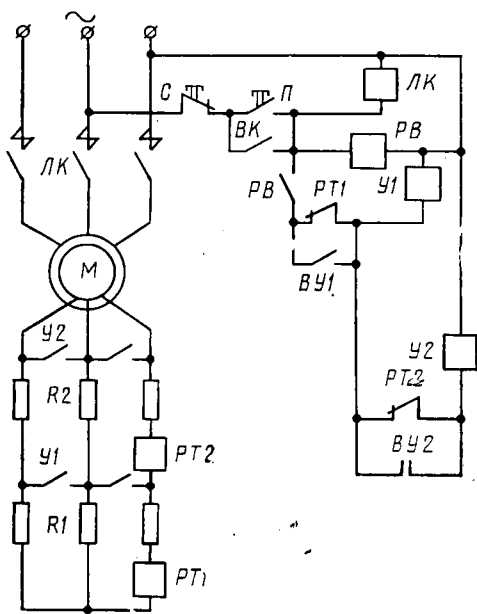


Рис. 1-2. Схема пуска асинхронного двигателя

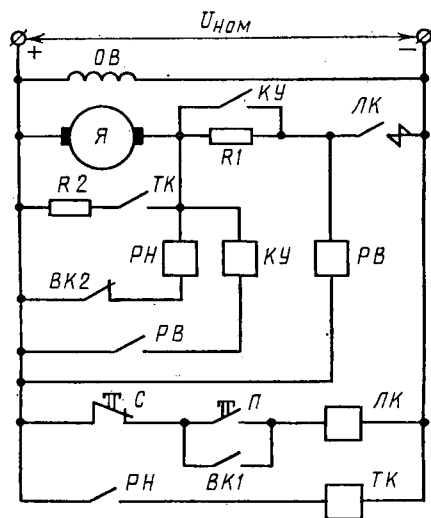


Рис. 1-3. Схема управления двигателем постоянного тока

Под воздействием тока, протекающего через обмотки реле *РТ1* и *РТ2* и превышающего токи их трогания, эти реле срабатывают и размыкают контакты *РТ1* и *РТ2*, подготавливая тем самым соответствующие цепи схемы управления к нормальному функционированию в режиме пуска двигателя. Обмотка реле времени *РВ* оказывается под напряжением одновременно с обмоткой контактора *ЛК*. Реле времени представляет собой аппарат, в котором предусмотрена возможность создания регулируемой выдержки времени между моментом подачи напряжения на обмотку и моментом замыкания (или размыкания) его контактов. В данном случае контакты реле времени *РВ* замыкаются через заданный интервал времени — после размыкания контактов *РТ1* и *РТ2*.

По мере разгона двигателя ток в роторе уменьшается. При достижении значения тока отпущения реле *РТ1* это реле воз-

вращается в исходное положение и замыкает контакты $PT1$. Через них подается напряжение на обмотку контактора $Y1$, который срабатывает, замыкает главные контакты $Y1$, включенные в роторную цепь, и закорачивает резисторы $R1$. При срабатывании контактора $Y1$ замыкаются его вспомогательные контакты $BY1$, а когда ток в роторной цепи снова уменьшается, реле $PT2$ отпускает и замыкает контакты $PT2$. Обмотка контактора $Y2$ оказывается под напряжением. Главные контакты контактора $Y2$ закорачивают вторую ступень резисторов $R2$ в цепи ротора. Разгон двигателя закончен. Одновременно со срабатыванием контакторов $Y1$ и $Y2$ замыкаются их вспомогательные контакты $BY1$ и $BY2$, переключая на себя часть тока с контактов токовых реле $PT1$ и $PT2$ и облегчая этим условия их работы.

В схемах электропривода контакторы $Y1$ и $Y2$ принято называть *контакторами ускорения*, а реле $PT1$ и $PT2$ — *реле ускорения*. Совокупность этих контакторов, различных реле и других элементов иногда называют *станциями управления*.

Составными элементами схемы (рис. 1-2) являются резисторы $R1$ и $R2$, которые принято называть *пусковыми*. Обычно они представляют собой самостоятельные элементы или элементы, являющиеся составной частью электрического аппарата и позволяющие ограничивать значения тока в установке или изменять падение напряжения в том или ином ее звене. Кроме пусковых резисторов существуют *пусковые реостаты*, которые выполняют практически те же функции, что и пусковые резисторы.

Рассмотренные схемы относятся к управлению двигателями переменного тока и их защите от аварийных режимов. На рис. 1-3 приведена схема управления двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (обмотка возбуждения $ОВ$ включена на полное напряжение $U_{ном}$).

При нажатии пусковой кнопки $П$ срабатывает контактор $ЛК$ и якорь двигателя $Я$ оказывается под током, значение которого на некоторое время ограничивает резистор $R1$. При отпускании кнопки $П$ схема продолжает работать, так как кнопка шунтируется вспомогательным контактом $BK1$, механически связанным с контактором $ЛК$. В необходимый момент времени замыкаются контакты $PВ$ задающего органа и включается контактор $КУ$, контакты которого шунтируют резистор $R1$. Момент замыкания контактов $PВ$ может задаваться различными способами, например по принципу времени, когда специальное реле времени $PВ$ включает контактор $КУ$ через определенную выдержку времени после срабатывания контактора $ЛК$. Таким образом двигатель начинает работать в нормальном режиме.

Для отключения двигателя необходимо нажать кнопку $С$. При этом контактор $ЛК$ возвращается в исходное состояние, а схема управления автоматически осуществляет динамическое торможение двигателя. За счет наведенной в якоре ЭДС срабатывает реле напряжения $РН$ (контакты $BK2$ относятся к кон-

тактору *ЛК* и в это время они замыкаются). Напряжение сети через контакты *РН* подается на обмотку контактора *ТК*, он срабатывает и его контакты *ТК* включают резистор *R2* параллельно обмотке якоря двигателя. Начинается динамическое торможение двигателя. Снижение частоты его вращения вызывает уменьшение ЭДС, наводимой в обмотке якоря. Когда напряжение на обмотке якоря становится равным напряжению отпускания реле *РН*, оно отпускает и разрывает своими контактами цепь обмотки контактора *ТК*, который при этом отключается, и двигатель окончательно затормаживается под действием статического момента.

Реле напряжения срабатывает при заданном значении напряжения срабатывания, а возвращается в отключенное состояние при определенном напряжении отпускания (возврата). В реле предусмотрена возможность регулирования той или другой величины напряжения в определенных пределах.

В схемах управления часто применяют так называемые *промежуточные реле*. Эти реле обычно имеют одну оперативную обмотку и много пар контактов. На обмотку подается единственный сигнал через один контакт, не зависящий от промежуточного реле. В то же время при срабатывании этого реле сравнительно большое количество его контактов способно коммутировать число цепей, равное числу пар контактов, т. е. подавать в цепи управления значительно большее количество сигналов по сравнению с начальным, поданным на обмотку реле. Контакты этих реле могут пропускать существенно большие токи по сравнению с током, проходящим через обмотку.

В электроприводе широко применяются *электромагнитные муфты*. В отличие от других видов муфт они приводятся в действие электромагнитной силой, развиваемой за счет тока обмотки муфты. Электромагнитные муфты применяются для автоматического сцепления и расцепления отдельных элементов привода, дистанционного управления этими операциями, изменения направления вращения в отдельных звеньях электропривода.

Применяются аппараты управления, называемые *командопартами*. К ним относятся, например, путевые выключатели — коммутационные аппараты, кинематически связанные с подвижной системой какого-либо механизма и предназначенные для срабатывания на заданном участке пути. Разновидностью путевых выключателей являются конечные выключатели, срабатывающие в конце пути подвижной системы какой-либо установки. Они используются как ограничители хода в подъемно-транспортных механизмах, ограничители хода суппорта в металлорежущих станках и т. п.

В технике управления электрическими приводами широко применяются *бесконтактные аппараты*, основанные на полупроводниковых приборах или магнитных усилителях. Они не имеют контактов и других подвижных элементов и это определило ряд их преимуществ перед контактными, главное из кото-

рых — отсутствие электрической дуги при коммутации тока (бездуговая коммутация).

Разработка *сверхпроводящих материалов* приводит к созданию электромагнитов, электрических машин и кабелей на сверхпроводниках. На рис. 1-4, а показан прогресс в разработке сверхпроводниковых (открытых) материалов по годам и их критические температуры $T_{кр}$, при которых наступает сверхпроводящее состояние. На рис. 1-4, б, в даны варианты электрических

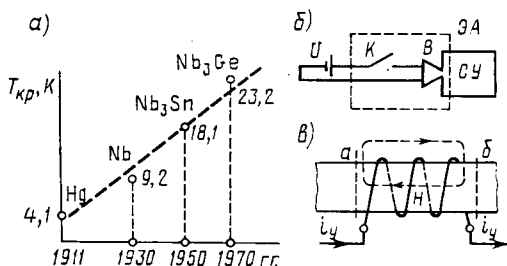


Рис. 1-4. Схемы аппаратов для сверхпроводящих установок

аппаратов для коммутации тока в сверхпроводящих установках. В варианте (б) коммутирующие контакты K располагаются вне зоны сверхпроводникового устройства СУ и электрический аппарат ЭА представляет комплекс из контактной системы K и токоввода B в сверхпроводниковое устройство СУ. В варианте (в) коммутация тока достигается путем перевода участка $a - б$ сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в обычное (и наоборот). Как известно, это можно получить путем изменения напряженности H магнитного поля за счет изменения тока управления i_y в обмотке.

§ 1-2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ КОММУТАЦИИ ТОКА ПРИ НИЗКОМ НАПЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА

Основные виды коммутации — это *включение и отключение тока*. Коммутация осуществляется как контактными, так и бесконтактными аппаратами. В сетях низкого напряжения (до 1000 В и выше) появляются особенности этих процессов в сравнении с тем, что наблюдается при коммутации высоковольтных сетей. Процесс включения активно индуктивной цепи постоянного тока на напряжение U_0 описывается дифференциальным уравнением $iR + L di/dt = U_0$, решение которого при начальном условии $t = 0, i = 0$ имеет вид

$$i = (U_0/R) \{1 - \exp[-t/(L/R)]\}, \quad (1-1)$$

где L — индуктивность, Гн; R — активное сопротивление цепи Ом; t — время, с; $\exp(x) = e^x$.

Скорость нарастания тока определяется электромагнитной постоянной времени цепи

$$\tau_s = L/R. \quad (1-2)$$

В низковольтных установках она невелика ($\tau_3 = 10^{-3} \div 10^{-2}$ с), поэтому установившееся значение тока достигается быстро.

Включение активно индуктивной цепи на синусоидальное напряжение описывается уравнением

$$iR + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} U_{\text{ном}} \sin(\omega t + \psi),$$

где ψ — начальная фаза напряжения в момент включения (определяет напряжение источника в момент включения $t = 0$, равное $\sqrt{2} U_{\text{ном}} \sin \psi$).

Решение этого уравнения при начальном условии $t = 0, i = 0$, приводит к следующему выражению для тока включения:

$$i = [\sqrt{2} U_{\text{ном}} / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}] [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \exp(-t/\tau_3) \sin(\psi - \varphi)]. \quad (1-3)$$

В него входят две составляющие — принужденного режима (установившийся ток)

$$i_{\text{уст}} = [\sqrt{2} U_{\text{ном}} / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}] \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

и свободного режима (апериодическая составляющая)

$$i_{\text{анер}} = [\sqrt{2} U_{\text{ном}} / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}] [\exp(-t/\tau_3) \sin(\psi - \varphi)].$$

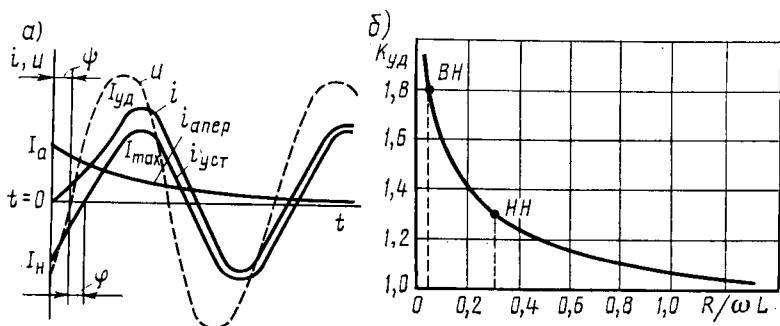


Рис. 1-5. Изменение токов при включении (а) и зависимость ударного коэффициента $K_{\text{уд}}$ от $R/\omega L$ (б)

Кривые изменения во время установившегося $i_{\text{уст}}$ и результирующего i токов даны на рис. 1-5, а. Из кривых видно, что ударный ток включения $I_{\text{уд}}$ превышает амплитуду I_{max} установившегося тока:

$$I_{\text{уд}} > I_{\text{max}} = \sqrt{2} I_{\text{ном}} = \sqrt{2} U_{\text{ном}} / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Из анализа (1-3) следует, что наибольшие значения тока $I_{\text{уд}}$ достигаются, когда момент включения цепи соответствует амплитудному значению установившегося тока, который протекал бы по цепи во включенном состоянии. Если цепь индуктивная

($\omega L \gg R$, $\varphi \approx \pi/2$), то эти условия достигаются, когда включение происходит в момент прохождения через нулевое значение напряжения источника ($\psi = 0$). Если цепь активная ($\omega L \ll R$, $\varphi \approx 0$), то максимальное значение тока $I_{уд}$ достигается, когда включение цепи происходит в момент времени, соответствующий амплитудному значению напряжения ($\psi = \pi/2$). Отношение ударного тока включения $I_{уд}$ к амплитудному значению установившегося тока называется *ударным коэффициентом*: $K_{уд} = I_{уд}/I_{\max}$. Ударный ток наступает в момент времени, примерно равный $t \approx \pi/\omega$

Ударный коэффициент

$$K_{уд} = \sin(\omega\pi/\omega + \psi - \varphi) - \exp[-\pi/(\omega\tau_3)] \sin(\psi - \varphi). \quad (1-4)$$

Это выражение при $\varphi = 0$ и $\psi = \pi/2$, а также при $\varphi = \pi/2$ и $\psi = 0$ примет вид

$$K_{уд} = 1 + \exp[-\pi/(\omega\tau_3)]. \quad (1-5)$$

Ударный коэффициент $K_{уд}$ зависит от степени затухания аperiodической составляющей тока, которая определяется электромагнитной постоянной времени цепи τ_3 . На рис. 1-5, б показана *зависимость ударного коэффициента* от отношения активного сопротивления R к индуктивному сопротивлению ωL включаемой цепи. Характерные значения ударного коэффициента следующие: 1, 3 — для сетей низкого напряжения (НН), 1, 8 — для сетей высокого напряжения (ВН).

Сравнительно небольшое значение ударного коэффициента для установок низкого напряжения, в которых работают аппараты управления, определяется малым значением *электромагнитной постоянной времени* $\tau_3 = L/R$, измеряемой обычно сотыми, а иногда и тысячными долями секунды. Снижение ударного тока короткого замыкания существенно облегчает условия работы аппаратов.

Отключение электрической цепи аппаратом представляет собой процесс перехода коммутирующего органа аппарата из состояния проводника электрического тока в состояние непроводника (диэлектрика). Это характерно и для контактных и бесконтактных, в том числе полупроводниковых, коммутирующих устройств.

При размыкании контактов контактных аппаратов обычно образуется *электрическая дуга*, сопротивление которой в процессе гашения возрастает. Когда дуга погашается и остаточный столб ионизированных газов рассеивается, электрическое сопротивление образовавшегося промежутка между контактами равняется бесконечности. С инженерной точки зрения наиболее важной характеристикой отключающего аппарата является присущая коммутирующему элементу *электрическая прочность*, которая во включенном состоянии равняется нулю. В процессе отключения электрическая прочность нарастает до величины, равной напряжению, которое выдерживает коммутирующий элемент в отклю-

ченном состоянии. Электрическая прочность, образующаяся в процессе отключения цепи и называемая *восстанавливающейся прочностью*, противостоит нарастающему на коммутирующем элементе напряжению. Характер протекания процесса отключения цепи определяется закономерностью изменения во времени этих величин. Цепь быстро отключается тогда, когда восстанавливающаяся прочность достаточна, чтобы выдержать напряжение, восстанавливающееся на аппарате, т. е. когда кривая восстанавливающейся прочности лежит выше кривой напряжения.

Общее условие отключения цепи аппаратом можно сформулировать так: *аппарат отключает цепь, и коммутирующий элемент приобретает свойства диэлектрика, если его электрическая прочность в процессе отключения выше напряжения на нем.*

На рис. 1-6, а представлено взаимное положение кривых восстанавливающегося напряжения U_v и восстанавливающейся прочности $U_{в.п}$ за переходом тока через нулевое значение, обес-

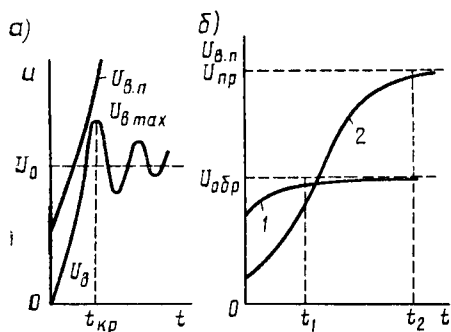
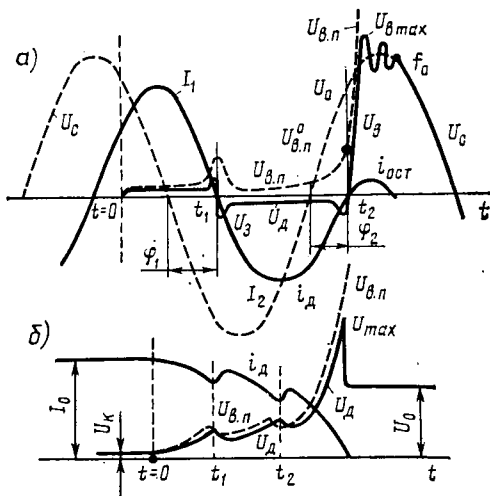


Рис. 1-6. Соотношение кривых U_v и $U_{в.п}$ из условия отключения цепи повременного тока (а) и кривые восстанавливающейся прочности (б)

Рис. 1-7. Характерные кривые процессов при отключении цепей



печивающее условия отключения цепи переменного тока. На рис. 1-6, б даны характерные кривые роста восстанавливающейся прочности в бесконтактном полупроводниковом аппарате 1 и в контактном аппарате 2. В бесконтактном аппарате прочность восстанавливается быстро ($t_1 < 10$ мкс), но до невысоких значений (обратное напряжение $U_{обр}$ — сотни вольт). В контактном аппарате процесс восстановления прочности более длительный ($t_2 \approx 1 \div 2$ мс), но она возрастает до значений пробивного напряжения $U_{пр}$ газового промежутка между контактами, которое измеряется тысячами вольт (для слоя воздуха толщиной 1 см — $U_{пр} \approx 33000$ В).

Рассмотрим процессы отключения цепей контактными аппаратами, когда возникает и гасится электрическая дуга. Характер процессов отключения переменного тока в активно-индуктивной цепи можно изобразить в виде кривых (рис. 1-7, а). За моментом размыкания контактов аппарата ($t=0$) в момент времени t_1 происходит первый переход тока дуги через нулевое значение. Восстанавливающаяся прочность $U_{в.п}$ может быть еще недостаточно высокой и за первым полупериодом тока дуги следует ее повторное зажигание при напряжении зажигания U_3 . За счет роста активного сопротивления дуги искажается синусоида тока (около перехода тока через нуль).

Во втором полупериоде горения дуги ($t_1 - t_2$) ее сопротивление значительно возрастает. В результате ток i_d ограничивается этим сопротивлением и угол сдвига фаз между током и напряжением сети к моменту времени t_2 уменьшается. Необходимо отметить, что в данном случае понятие об угле сдвига фаз носит условный характер. Как известно, это понятие относится к чисто синусоидальным явлениям. Здесь синусоида тока искажается за счет роста во времени активного сопротивления дуги. Но отрезок времени между моментами перехода через нулевое значение тока дуги и напряжения сети, выраженный в электрических градусах, также условно назовем *углом сдвига фаз*. За вторым переходом тока дуги через нуль столб дуги разрушается, кривая $U_{в.п}$ находится выше кривой $U_в$. После этого перехода межконтактный промежуток может сохранить так называемую *остаточную проводимость*, присущую той или иной стадии газового разряда. В этом случае в процессе восстановления напряжения по нему проходит остаточный ток $i_{ост}$. Рациональным условием гашения дуги переменного тока следует считать такое, когда гашение осуществляется в первый после размыкания контактов переход тока через нулевое значение.

Коммутационные возможности электрической дуги отключения определяются характером роста ее активного сопротивления. *Вольтамперная характеристика дуги* определяет зависимость между напряжением и током дуги, а следовательно, она описывает закономерность изменения сопротивления дуги при изменении тока. В динамическом режиме эту зависимость можно выразить следующей формулой [19]:

$$(1/i_d) di_d/dt - (1/E_d) dE_d/dt = (1/\vartheta) [(E_d i_d / P_0) - 1], \quad (1-6)$$

где i_d — ток дуги, А; E_d — градиент напряжения дуги, В/см; t — время, с; ϑ — постоянная времени дуги, с; P_0 — удельная отводимая мощность от дуги, Вт/см.

Это уравнение относится к единице длины дуги. Его можно легко преобразовать для случая, когда длина дуги равна l_d .

Тепловые параметры ϑ и P_0 определяют влияние физических факторов на характеристику дуги. *Тепловая постоянная времени дуги* ϑ характеризуют инерционность дуги — она представ-

ляет время, в течение которого дуга изменяет свое сопротивление в $e = 2,7$ раз. Удельная отводимая мощность P_0 характеризует интенсивность отвода теплоты от единицы длины дуги. Характерные значения тепловых параметров: для аппаратов низкого напряжения $\vartheta = 10 \div 1000$ мкс, $P_0 = 100 \div 10\,000$ Вт см.

Для синусоидального отключаемого тока I_0 : $i_d = \sqrt{2} I_0 \sin \omega (t + t_p)$, где t_p — определяет момент размыкания контактов относительно синусоиды тока (время от момента предшествующего перехода тока через нулевое значение до момента размыкания контактов).

Разрешенное относительно сопротивления дуги R_d уравнение (1-6) приобретает вид [3]

$$R_d = \frac{P_0 l_d}{2I_0^2 [2\omega^2 \vartheta^2 + \sin^2 \omega (t_p + t) - \omega \vartheta \sin 2\omega (t_p + t)]}. \quad (1-7)$$

Отсюда напряжение дуги

$$U_d = \frac{P_0 l_d \sin \omega (t_p + t)}{\sqrt{2} I_0 [2\omega^2 \vartheta^2 + \sin^2 \omega (t_p + t) - \omega \vartheta \sin 2\omega (t_p + t)]}.$$

Мощность дуги

$$P_d = \frac{P_0 l_d \sin^2 \omega (t_p + t)}{2\omega^2 \vartheta^2 + \sin^2 \omega (t_p + t) - \omega \vartheta \sin 2\omega (t_p + t)}.$$

В момент перехода тока через нулевое значение сопротивление дуги

$$R_d^0 = P_0 l_d / (4\omega^2 I_0^2 \vartheta^2). \quad (1-8)$$

В этих выражениях l_d — длина дуги, см.

Перенапряжение, которое возникает при описанном характере отключения переменного тока, определяется значением максимального восстанавливающегося напряжения $U_{в\max}$ (рис. 1-7, а). По теории восстанавливающегося напряжения

$$U_{в\max} = K_a U_0. \quad (1-9)$$

Напряжение источника тока в момент перехода тока через нулевое значение — возвращающееся напряжение

$$U_0 = \sqrt{2/3} K_{cx} U_{ном} \sin \varphi, \quad (1-10)$$

где $U_{ном}$ — действующее значение напряжения источника; φ — угол сдвига фаз между током и напряжением; K_{cx} — коэффициент схемы (для трехфазной $K_{cx} = 1,5$, для однофазной $K_{cx} = 1,73$).

Коэффициент амплитуды восстанавливающегося напряжения, определяющий кратность перенапряжений [4],

$$K_a = U_{в\max} / U_0 = 1 + \exp [(-\pi \sqrt{LC/2}) (R/L + 1, CR_{ш})]. \quad (1-11)$$

Здесь R и L — активное сопротивление (Ом) и индуктивность нагрузки отключаемой цепи, Гн; C — электрическая емкость, параллельная коммутирующему элементу аппарата, Ф; $R_{ш}$ — сопротивление, шунтирующее коммутирующий орган (или сопротивление самого коммутирующего элемента в процессе восстановления напряжения), Ом.

Обычно коэффициент $K_a = 1,0 \div 2,0$ и перенапряжения при отключении активно индуктивных цепей не превышают двукратной величины относительно амплитуды напряжения источника питания.

Средняя скорость восстановления напряжения

$$(dU_{\text{в}}/dt)_{\text{ср}} \approx 2K_a f_0 U_0, \quad (1-12)$$

где *собственная частота цепи* (Гц)

$$f_0 = 1/(2\pi \sqrt{LC}). \quad (1-13)$$

Максимальное значение восстанавливающегося напряжения $U_{\text{в max}}$ достигается в момент времени $t_{\text{кр}}$ за переходом тока через нуль (рис. 1-6, а). Согласно теории восстанавливающегося напряжения время (с)

$$t_{\text{кр}} \approx 1/2f_0, \quad (1-14)$$

где f_0 — собственная частота сети, Гц.

В сравнении с отключением цепей высокого напряжения процесс отключения переменного тока на низком напряжении имеет характерные особенности. Обычно не наблюдаются срезы тока или его быстрые спады до нуля за счет скачкообразного роста электрического сопротивления коммутирующего органа. Поэтому моменты перехода через нулевое значение тока и напряжения на коммутирующем органе совпадают. Сопротивление дуги носит чисто активный характер и индуктивная слагающая в нем незначительна. Сопротивление электрической дуги соизмеримо с сопротивлением отключаемой нагрузки и даже может существенно превышать его, а при токах короткого замыкания оно значительно больше сопротивления короткозамкнутой цепи. Поэтому при отключении переменного тока наблюдается уменьшение тока дуги по полупериодам ее горения ($I_1 < I_0$ на рис. 1-7, а) и уменьшение угла сдвига фаз между током и напряжением в моменты переходов тока дуги через нулевое значение ($\varphi_1 < \varphi_0$ на рис. 1-7, а).

По степени уменьшения условного угла сдвига фаз между током и напряжением можно судить о значении некоторого эквивалентного сопротивления дуги переменного тока в сравнении с полным сопротивлением отключаемой цепи. Предположим (рис. 1-7, а), что контакты аппарата расходятся в момент $t = 0$. Ток дуги i_d и условный сдвиг фаз между моментами перехода

тока и напряжения через нулевое значение постепенно уменьшаются ($\varphi_0 > \varphi_1$). Обозначим Z_0 — полное сопротивление отключаемой цепи, которое определяет начальный отключаемый ток I_0 . Пусть $R_{д.э}$ — некоторое эквивалентное сопротивление дуги, вычисленное по изменению условного угла сдвига фаз между током и напряжением в тот или иной их переход через нулевое значение. Определив по осциллограмме углы φ_0 и $\varphi_1 \dots \varphi_x$, можно найти величину $R_{д.э}$, которая вызывает уменьшение угла сдвига фаз при горении дуги. В действительности $\sin \varphi_x = X_0 / \sqrt{X_0^2 + (R_0 + R_{д.э})^2}$, где X_0 и R_0 — индуктивное и активное сопротивления цепи, Ом.

В свою очередь,

$$X_0 = Z_0 \sin \varphi_0; R_0 = Z_0 \cos \varphi_0; Z_0 = \sqrt{X_0^2 + R_0^2} = U_{ном} / I_0,$$

где φ_0 — угол сдвига фаз между током и напряжением при замкнутом состоянии контактов.

Отсюда

$$R_{д.э} = Z_0 \sin \varphi_0 \operatorname{ctg} \varphi_x - R_0; \quad (1-15)$$

здесь φ_x — условный угол сдвига фаз в x -й переход тока через нулевое значение ($x = 1, 2, 3$ и т. д.; на рис. 1-7, $a - \varphi_x = \varphi_1$).

На рис. 1-8 приведены опытные зависимости отношения эквивалентного сопротивления дуги $R_{д.э}$ к сопротивлению нагрузки Z_0 от отключаемого тока I_0 . Зависимость 3 относится к гашению открытой дуги в течение первого полупериода тока дуги. К условиям гашения дуги в щелевой камере относятся кривая 2 (для первого полупериода тока дуги) и кривая 1 (для второго полупериода тока). Из этих зависимостей легко установить степень влияния продолжительности горения дуги на величину $R_{д.э}$. Так, для щелевых камер при $I_0 = 1500$ А отношение $R_{д.э} / Z_0 \approx 2$, если дуга горит один полупериод (0,01 с), и $R_{д.э} / Z_0 \approx 5$, если время горения дуги увеличивается до двух полупериодов ($\approx 0,02$ с).

Увеличиваясь при гашении дуги переменного тока ее активное сопротивление, будучи последовательно включенным с сопротивлением отключаемой цепи, ограничивает величину тока. В реальных условиях нередко получается так, что амплитудное значение тока дуги, например, в третий полупериод ее горения, в несколько раз меньше амплитудного значения начального тока цепи $I_{0 \max}$, соответствующего замкнутому состоянию контактов. Одновременно увеличение сопротивления дуги

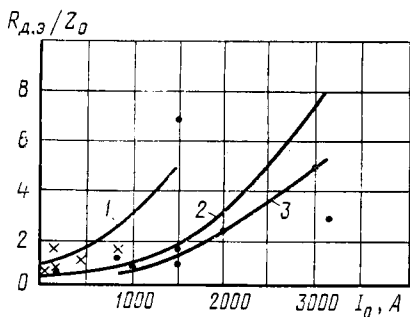


Рис. 1-8. Отношение $R_{д.э} / Z_0$ в функции I_0

уменьшает условный сдвиг фаз между током и напряжением, вследствие чего уменьшается напряжение в момент перехода тока через нулевое значение.

Снижение амплитудного значения тока дуги ведет к увеличению восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка, а уменьшение сдвига между моментом перехода через нулевое значение тока дуги и напряжения источника — к снижению мгновенных значений восстанавливающегося напряжения. Эти факторы облегчают условия отключения цепи и проявляются тем сильнее, чем ниже напряжение сети и чем больше отключаемый ток. В этом существенное отличие условий гашения дуги в сетях низкого напряжения по сравнению с высоковольтными сетями, где указанные факторы не играют никакой роли.

При постоянном токе межконтактный промежуток также превращается из проводника в диэлектрик. Следовательно, он также должен проходить последовательно все стадии газового разряда, начиная от дугового. Характер процессов предположительно можно представить в таком виде. За моментом замыкания контактов ($t = 0$ на рис. 1-7, б) увеличиваются сопротивление и напряжение дуги U_d и уменьшается ток дуги i_d . На участке $0 - t_1$ восстанавливающаяся прочность больше напряжения дуги. В момент времени t_1 наступают такие условия, когда напряжение U_d становится выше прочности межконтактного промежутка и наступает явление, тождественное „повторному зажиганию“ дуги: R_d уменьшается, ток возрастает. Затем процессы повторяются, пока не возникнет следующее частичное повторное зажигание в момент времени t_2 . В дугогасительной системе создаются такие условия, при которых прочность всегда выше напряжения дуги и дуга гаснет окончательно. Ток становится равным нулю, перенапряжения $U_{\max}$ спадают до напряжения сети U_0 . В конце процесса, при малых токах, дуговой разряд сменяется другими видами газового разряда.

Изложенная схема процесса гашения дуги постоянного тока не должна противоречить известному условию гашения: вольтамперная характеристика дуги должна лежать выше реостатной характеристики цепи. Как вольтамперная характеристика дуги, так и присущая дуге прочность определяются общим фактором — сопротивлением столба дуги. Поэтому второе условие должно согласоваться с первым.

В моменты времени t_1 и t_2 (см. рис. 1-7, б) восстанавливающаяся прочность равна напряжению дуги и первая производная напряжения по времени равна нулю. Это согласуется с физическим представлением о прочности межконтактного промежутка в стадии дугового разряда. Действительно, прочность промежутка равна напряжению дуги, когда подводимая к дуге и отводимая от нее мощности становятся равными друг другу. В это время производная напряжения дуги U_d по времени должна быть равна нулю. Следовательно, по максимумам (и миниму-

мам) напряжения дуги можно судить о характере кривой роста прочности. В рационально сконструированном дугогасительном устройстве постоянного тока не должны происходить „повторные зажигания“, аналогичные указанным в моменты времени t_1 и t_2 (см. рис. 1-7, б).

Перенапряжения при отключении постоянного тока возникают вследствие того, что запасенная в электромагнитных полях энергия частично преобразуется в энергию электростатических полей. Электромагнитная энергия в индуктивности L при токе I_0

$$W_{\text{эм}} = LI_0^2/2. \quad (1-16)$$

Если бы при отключении тока (снижении его до нуля) вся эта энергия ушла на заряд емкости C , параллельной коммутирующему элементу, то в нем сосредоточилась бы электростатическая энергия $W_{\text{эс}} = CU_c^2/2$.

Из равенства $W_{\text{эм}} = W_{\text{эс}}$ получим зависимость для напряжения на емкости C и коммутирующем элементе: $U_c = I_0 \sqrt{L/C}$.

При реальных условиях, когда $I_0 = 1$ кА, $L = 10^{-3}$ Гн, $C = 10^{-7}$ Ф, получим $U_c = 100$ кВ.

В реальных условиях также высокие перенапряжения не возникают, так как основная доля электромагнитной энергии преобразуется в тепловую энергию электрической дуги и отводится в атмосферу (контактные аппараты) или поглощается специальным конденсатором относительно большой емкости (бесконтактные аппараты).

Обычно перенапряжения при отключении постоянного тока определяют по формуле, вытекающей из уравнения баланса напряжений в цепи:

$$U_{\text{max}} = U_0 + L di/dt. \quad (1-17)$$

Отсюда следует, что в рационально сконструированном аппарате скорость уменьшения тока должна быть не очень большой, а такой, чтобы обеспечить величину перенапряжения U_{max} , не превышающей напряжение источника питания более чем в пять раз. По окончании процесса отключения напряжение на коммутирующем элементе спадает с U_{max} до U_0 (см. рис. 1-7, б).

§ 1-3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Процесс нагрева проводника током описывается уравнением баланса энергии:

$$I^2 R dt = \gamma V_c dT + K_{\text{т}} S_0 (T - T_{\text{окр}}) dt, \quad (1-18)$$

где I — ток, А; R — сопротивление проводника, Ом; t — время, с; γ и c — плотность (г/см^3) и теплоемкость материала проводника, Дж/(г · град); V и S_0 — объем (см^3) и боковая поверхность

охлаждения проводника, см²; T и $T_{\text{окр}}$ — температура проводника и окружающей среды, °С.

В уравнении (1-18) принято, что процесс отдачи теплоты с поверхности описывается простейшей формулой Ньютона, в которой коэффициент теплопередачи K_T объединяет все виды теплопередачи (теплопроводность, конвекцию, излучение).

Если при $t=0$ начальную температуру принять равной T_n , то (1-18) приобретет вид

$$\theta = \theta_y [1 - \exp(-t/\tau_T)] + \theta_n \exp(-t/\tau_T), \quad (1-19)$$

где $\theta = T - T_{\text{окр}}$; $\theta_y = T_y - T_{\text{окр}}$; $\theta_n = T_n - T_{\text{окр}}$; T_y — установившаяся температура (при $t \rightarrow \infty$); θ — превышение температуры (температура перегрева над окружающей средой); $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

В установившемся режиме нагрева током получаем выражение для температуры нагрева бесконечно длинного проводника

$$T_y = T_{\text{окр}} + I^2 \rho / (K_T p S) \quad (1-20)$$

и для тепловой постоянной времени

$$\tau_T = S \gamma c / (K_T p), \quad (1-21)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала, Ом·см; p и S — периметр (см) и площадь поперечного сечения проводника, см².

Если $T_n = T_{\text{окр}}$, то с учетом (1-20) и (1-21) формула (1-19) для температуры проводника в процессе его нагрева приобретает вид

$$\begin{aligned} T &= T_{\text{окр}} + (I^2 \rho / K_T p S) [1 - \exp(-t/\tau_T)] = \\ &= T_{\text{окр}} + \theta_y [1 - \exp(-t/\tau_T)]. \end{aligned} \quad (1-22)$$

Процесс охлаждения проводника описывается уравнением

$$0 = K_T S_0 (T - T_{\text{окр}}) dt + \gamma V c dT.$$

Его решение имеет вид

$$\theta = \theta_n \exp(-t/\tau_T). \quad (1-23)$$

При заданном токе основная цель расчета обычно состоит в определении сечения токоведущей части, чтобы температура ее нагрева не превышала допустимую.

Допустимые температуры нагрева проводника (металл) и окружающей его изоляции неодинаковы. Диэлектрические свойства изоляции при высоких температурах значительно ухудшаются. Так, даже температуростойкая слюда при нагреве от 200 до 600°С снижает электрическую прочность в пять раз. Поэтому

температура нагрева токоведущих частей аппаратов регламентируется ГОСТ 8865—70 (табл. 1-1) в соответствии со свойствами примененной изоляции.

Таблица 1-1

Класс нагревостойкости	Температура, характеризующая нагревостойкость материала, °С	Краткая характеристика основных групп электроизоляционных материалов
У	90	Непропитанные или не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы или шелка, а также другие материалы и их сочетания
А	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы или шелка, а также другие материалы и их сочетания
Е	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также другие материалы и их сочетания
В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами, а также другие материалы и их сочетания
	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, и другие материалы
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также другие материалы и их сочетания
С	Более 180*	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов, в сочетании с неорганическими или элементарными органическими связующими составами, а также другие материалы и их сочетания

* Температура ограничивается физическими, химическими или электрическими свойствами материала.

При прохождении по проводнику переменного тока возникает поверхностный эффект и эффект близости. Вследствие этого увеличивается эквивалентное сопротивление проводника. При расчетах для вычисления удельного эквивалентного сопротивления используют формулу

$$\rho_{\text{эв}} = \rho_0 k_{\text{п.э}} k_{\text{бл}}, \quad (1-24)$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление проводника при постоянном токе, Ом · см; $k_{\text{п.э}}$ и $k_{\text{бл}}$ — коэффициент поверхностного эффекта и эффекта близости.

Поверхностный эффект, проявляющийся при изменяющемся токе, выражается в вытеснении линий тока к поверхности проводника, в результате чего плотность тока на периферии проводника выше, чем в его центре. Это эквивалентно увеличению сопротивления проводника и учитывается введением коэффициента $k_{п.э.}$, который для проводников круглого и прямоугольного сечения можно найти по рис. 1-9. По оси абсцисс отложен условный параметр $A = \sqrt{2\mu_0 f S / \rho}$, где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/см; f — частота тока, Гц; S — поперечное сечение проводника, см²; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом · см.

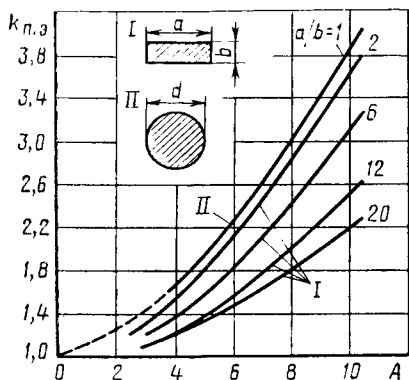


Рис. 1-9. Кривые для определения коэффициента поверхностного эффекта проводников круглого и прямоугольного сечения

Различия в размерах a и b (рис. 1-9) при определении $k_{п.э.}$ и $k_{бл}$ это сечение допустимо заменять эквивалентным круглым сечением.

Эффект близости появляется при изменяющихся токах в соседних проводниках и также выражается в вытеснении линий тока. При разном направлении токов наибольшие их плотности имеются на обращенных друг к другу внутренних сторонах проводников, при одинаковом — на наружных сторонах. Коэффициент близости $k_{бл}$ проводников круглого сечения определяется по табл. 1-2.

Для проводников прямоугольного сечения с небольшим раз-

Таблица 1-2

k_x	$k_{бл}$ для различных l/d				
	1.03	1.27	1.68	2.0	6.5
100	1,15	1,06	1,03	1,02	1,005
200	1,46	1,38	1,13	1,08	1,01
300	1,7	1,55	1,16	1,09	1,02
400	1,93	—	1,18	1,1	1,03
500	2,1	—	1,2	1,12	1,04
600	2,23	—	1,21	1,13	1,05

Здесь $k_x = \sqrt{f/R_{100}}$ — условный коэффициент; l — расстояние между осями проводников, см; d — диаметр проводников, см; f — частота тока, Гц; R_{100} — сопротивление проводника длиной 100 м, Ом.

Общая задача расчета токоведущих элементов сводится к определению одного из трех факторов при заданных двух других: величины тока, температуры нагрева и поперечного сечения проводника. Рассмотрим расчетные соотношения для двух характерных условий нагрева и охлаждения токоведущего элемента.

Проводник с током в воздухе. В варианте, изображенном на рис. 1-10, а, проводник крепится на элементах, отвод теплоты в которые можно не учитывать из-за их малых размеров. В варианте (рис. 1-10, б) отводом теплоты в нижнее изоляционное основание можно пренебречь из-за его большой толщины Δ и большого теплового сопротивления.

Для теплового расчета токоведущих частей в установившемся режиме используем зависимость (1-20), которая с учетом влияния температурного коэффициента сопротивления α приобретает вид

$$(T - T_{\text{окр}}) = I^2 \rho_{\text{экв}} (1 + \alpha T) / (K_T p S), \quad (1-25)$$

где T — температура нагрева проводника, °C; $\rho_{\text{экв}}$ — эквивалентное удельное электрическое сопротивление проводника, Ом · см; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/град; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды (обычно 40°C); K_T — коэффициент теплопередачи, Вт/(см² · град); p — периметр поперечного сечения проводника, см; S — поперечное сечение проводника, см².

Из формулы (1-25)

$$p S = I^2 \rho_{\text{экв}} (1 + \alpha T) / [K_T (T - T_{\text{окр}})].$$

При заданных $T = T_{\text{доп}}$, токе $I_{\text{ном}}$, материале проводника ($\rho_{\text{экв}}$ и α), K_T и $T_{\text{окр}}$ имеем:

для круглого проводника (рис. 1-10, а) у которого $p S = \pi d^3 / 4$,

$$d = \sqrt[3]{[4 I_{\text{ном}}^2 \rho_{\text{экв}} (1 + \alpha T_{\text{доп}})] / [\pi^2 K_T (T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})]}; \quad (1-26)$$

для проводника с прямоугольным сечением со сторонами a и b с учетом обозначения $m = b/a$, когда $p S = 2m(1+m)a^3$,

$$a = \sqrt[3]{[\rho_{\text{экв}} (1 + \alpha T_{\text{доп}}) I_{\text{ном}}^2] / [2m(m+1) K_T (T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})]}; \quad (1-27)$$

для прямоугольного проводника, расположенного на толстом изоляционном основании (рис. 1-10, б), когда $p S \approx m(m+2)a^3$,

$$a = \sqrt[3]{[\rho_{\text{экв}} I_{\text{ном}}^2 (1 + \alpha T_{\text{доп}})] / [m(m+2) K_T (T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})]}. \quad (1-28)$$

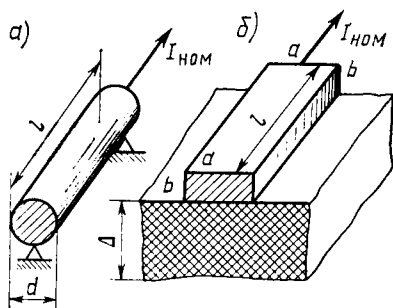


Рис. 1-10. Варианты размещения токоведущих элементов

Обычно величина m находится в пределах от 0,25 до 0,5.

Зависимость (1-25) можно преобразовать к виду, удобному для вычисления температуры при заданных токе и размерах поперечного сечения или нахождения допустимого тока $I_{\text{ном}}$ при заданных $T_{\text{доп}}$ и размерах сечения:

$$T = T_{\text{окр}} + I_{\text{ном}}^2 \rho_{\text{эвк}} (1 + \alpha T_{\text{доп}}) / (K_T p S); \quad (1-29)$$

$$I_{\text{ном}} = \sqrt{[K_T p S (T_{\text{доп}} - T_{\text{окр}})] / [\rho_{\text{эвк}} (1 + \alpha T_{\text{доп}})]}. \quad (1-30)$$

При ориентировочных расчетах коэффициент теплопередачи для горизонтальных плоских медных шин $K_T = (6 \div 9) \times 10^{-4}$ Вт/(см² · град), для стальных поверхностей $K_T = (10 \div 14) \times 10^{-4}$, для круглых медных стержней $K_T = (9 \div 13) \cdot 10^{-4}$. Но этот коэффициент не остается постоянным, а зависит от температуры нагрева проводника T и температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$. Существует зависимость этого коэффициента, найденная на основе теории теплового подобия [20] [Вт/(см² · град)]:

$$K_T = 1,33 \cdot 10^{-4} \{ (T - T_{\text{окр}}) / l \}^{1/4} + 2,04 \cdot 10^{-11} T_{\text{окр}}^{\epsilon} \{ [2,08 (T + 273) / (T_{\text{окр}} + 273)] - 1 \}. \quad (1-31)$$

Здесь T — температура, °С; l — размер проводника, м.

Обычно размер l берется в направлении наиболее интенсивного отвода теплоты. Так, для горизонтальных плоских шин за определяющий размер можно принять высоту шины, для горизонтальных круглых проводников — диаметр проводника. Степень черноты ϵ для наиболее характерных случаев находится в пределах:

Алюминиевые проводники	0,5—0,07
Медь окисленная	0,5—0,78
Латунь	0,6—0,22
Сталь окисленная	0,7—0,82
Сталь оцинкованная	0,22—0,276
Чугун	0,25—0,81

Коэффициент теплопередачи для металлических прямоугольных шин

$$K_T = 0,92 \cdot 10^{-3} [1 + 0,9 \cdot 10^{-2} (T - T_{\text{окр}})]. \quad (1-32)$$

Аналогичная зависимость для круглых проводников имеет вид

$$K_T = K_1 \cdot 10^{-3} [1 + K_2 (T - T_{\text{окр}})]. \quad (1-33)$$

Для проводника диаметром $d = 10$ мм коэффициенты $K_1 = 1,24$, $K_2 = 1,14$; для $d = 40$ мм $K_1 = 1,11$, $K_2 = 0,88$; для $d = 80$ мм $K_1 = 1,08$, $K_2 = 0,75$.

Физические свойства проводниковых материалов даны в табл. 1-3.

Зависимости допустимой плотности тока j от сечения S круглых медных и алюминиевых проводников в воздухе даны на рис. 1-11. Снижение допустимой плотности тока с увеличением сечения проводников объясняется затрудненными условиями отвода теплоты от внутренних зон проводников.

Термическое воздействие токов короткого замыкания проявляется в нагревании проводников до высоких температур, которые особенно опасны для изоляционных конструкций, на которых эти проводники крепятся. Так как время прохождения этого тока невелико (обычно до 10 с), то и допустимые температуры нагрева в этом режиме существенно выше, чем в длительном режиме. В режиме прохождения этих токов доля энергии, отводимой от проводника в окружающую среду, обычно невелика в сравнении с выделяемой при нагреве током и идущей на повышение температуры проводника, и ее в расчетах не учитывают (адиабатный режим).

Тогда общее уравнение баланса энергии (1-18) приобретет вид

$$I_{к.з}^2 R dt = \gamma c V dT. \quad (1-34)$$

Так как в рассматриваемом режиме допустимая температура нагрева достаточно высокая (200 — 300°C), учтем влияние температурного коэффициента сопротивления α :

$$R = R_0 (1 + \alpha T). \quad (1-35)$$

Тогда (1-34) с учетом пределов интегрирования по времени ($t = 0 \div t_k$) и температуре ($T = T_n \div T_k$) приобретает вид

$$\int_0^{t_k} I_{к.з}^2 R_0 dt = \int_{T_n}^{T_k} \gamma c V dT / (1 + \alpha T),$$

где T_n и T_k — начальная и конечная температуры нагрева.

При интегрировании получаем

$$I_{к.з}^2 t_{к.з} = (\gamma c V / R_0 \alpha) \ln [(1 + \alpha T_k) / (1 + \alpha T_n)], \quad (1-36)$$

где $T_{к.з}$ и $t_{к.з}$ — ток короткого замыкания (А) и время его протекания, с; γ , c , $\rho_{э.кв}$, α — соответственно плотность (г/см³), теплоемкость [Дж/(г·град)], эквивалентное удельное электрическое

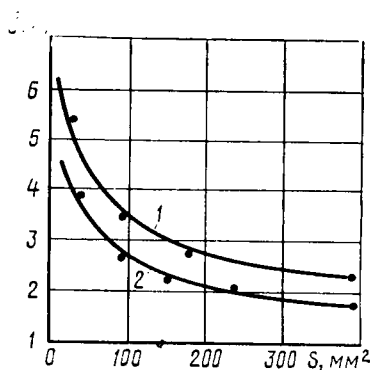


Рис. 1-11. Зависимость допустимой плотности тока от сечения медных 1 и алюминиевых 2 проводников

Таблица 1-3

Материал	Плотность, г/см ³	Удельное электрическое сопротивление ρ , 10 ⁻⁶ , Ом·см	Удельная теплоемкость с, Дж/(г·°C)	Коэффициент температурного расширения, 1/°C	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°C	Температура, °C			Напряжение, В				Теплота, Дж/г	
						разматывания	плавления	кипения	разматывания	плавления	кипения	сваривания (в воздухе)	плавления	испарения
Платина	21,4	11	0,135	0,7	0,0038	540	1773	4400	0,25	0,65	1,5	0,4	114	2 400
Золото	19,3	2,3	0,126	3,1	0,004	100	1063	2973	0,08	0,43	0,9	0,6	626	1 870
Иридий	22,4	5,5	0,126	0,6	0,0039	—	2450	5300	—	—	—	—	109	—
Палладий	12	10,8	0,23	0,7	0,0033	—	1554	4000	—	0,57	1,3	—	151	—
Серебро	10,5	1,65	0,234	4,18	0,004	180	960	2000	0,09	0,37	0,68	0,24	104	2 320
Вольфрам	19,3	5,5	0,14	1,9	0,005	1000	3390	5930	0,4	1,1	2,1	0,6	192	5 000
Медь	8,9	1,75	0,39	3,8	0,004	190	1083	2600	0,12	0,43	0,79	0,1	205	4 780
Графит	1,8	700	0,65	1,6	0,0013	—	3650	4830	2	5	—	—	—	14 000
Алюминий	2,7	2,910	0,96	2,1	0,004	150	658	2300	0,1	0,3	—	—	406	9 360
Галлий	5,91	53,4	0,33	0,33	0,00396	—	30	2227	—	—	—	—	80	4 250
Цинк	7,1	6,1	0,39	1,1	0,0037	170	419	906	0,1	0,17	—	—	100	1 800
Железо	7,8	10	0,64	0,6	0,0065	500	1540	2740	0,21	0,6	—	0,35	267	6 680
Ртуть	13,55	94	0,14	0,09	0,0092	—	38,7	357	—	—	—	—	86	2 350
Оксид кадмия	6,95	600	—	—	—	—	—	900	—	—	—	—	—	—

сопротивление (Ом·см) и температурный коэффициент (1/град) материала проводника.

Допустимая для аппарата величина произведения $I_{к.з}^2 t_{к.з}$ определяет термическую стойкость аппарата. Как видно из (1-36), она зависит от физических свойств материала проводника и допустимой температуры нагрева T_k изоляции проводника. В (1-36) под $I_{к.з}$ подразумевается действующее значение тока короткого замыкания (при переменном токе) или его установившееся значение (при постоянном токе). Апериодическую слагающую при определении термической стойкости аппаратов управления обычно можно не учитывать, так как в сетях низкого напряжения она быстро затухает; большая скорость затухания определяется малой величиной постоянной времени τ_z (сотые доли секунды).

С учетом выражения (1-24) для $\rho_{э.кв}$ из (1-36) находим выражение для плотности тока термической стойкости ($j_{к.з} = j_{т.с}$) при заданных времени $t_{т.с} = t_{к.з}$, температурах T_k и T_n :

$$j_{т.с} = I_{к.з}/S = \sqrt{\gamma c / (\rho_0 K_{п.э} K_{бл} \alpha t_{т.с}) \ln [(1 + \alpha T_k) / (1 + \alpha T_n)]}. \quad (1-37)$$

Сечение проводника при заданных величинах T_k , $t_{т.с}$ и $I_{т.с}$

$$S = \sqrt{I_{т.с}^2 \rho_0 K_{бл} K_{п.э} \alpha t_{т.с} / \{\gamma c \ln [(1 + \alpha T_k) / (1 + \alpha T_n)]\}}. \quad (1-38)$$

Если известно сечение, то ток термической стойкости

$$I_{т.с} = \sqrt{\gamma c S^2 \ln [(1 + \alpha T_k) / (1 + \alpha T_n)] / (\rho_0 K_{п.э} K_{бл} \alpha t_{т.с})}. \quad (1-39)$$

Время термической стойкости токоведущей части

$$t_{т.с} = \gamma c S^2 \ln [(1 + \alpha T_k) / (1 + \alpha T_n)] / (I_{т.с}^2 \rho_0 K_{п.э} K_{бл} \alpha). \quad (1-40)$$

Допустимые температуры нагрева токоведущих частей T_k в режиме тока короткого замыкания даны в табл. 1-4.

Таблица 1-4

Проводниковые материалы	$T_k, ^\circ\text{C}$			
	медь	латунь	алюминий	сталь
Неизолированные токоведущие части	200	300	200	400
Изолированные токоведущие части с изоляцией:				
класса У	200	200	200	200
класса А	250	250	200	250
классов В и С	300	300	200	400

Допустимая плотность тока (А/мм^2) для типичных проводниковых материалов и временах термической стойкости $t_{\text{т.с}}$ имеет следующие значения:

	$t_{\text{т.с}}=1 \text{ с}$	5 с	10 с
Медь	152	67	48
Алюминий	89	40	28
Латунь	73	38	27

Из (1-36) получаем соотношение между двумя разными значениями тока $I'_{\text{т.с}}$ и $I''_{\text{т.с}}$ и соответствующими им временами $t'_{\text{т.с}}$ и $t''_{\text{т.с}}$:

$$(I'_{\text{т.с}}/I''_{\text{т.с}}) = \sqrt{t''_{\text{т.с}}/t'_{\text{т.с}}} \quad (1-41)$$

Пример 1. По нагретому круглому медному проводнику диаметром $d = 1,0 \text{ см}$ проходит ток 500 А . Определить: постоянную времени нагрева; установившуюся температуру нагрева; температуру, принимаемую проводником за время, равное постоянной времени нагрева.

Условия: $T_{\text{н}} = T_{\text{окр}} = 35^\circ\text{С}$; $K_{\text{т}} \approx 10^{-3} \text{ Вт/}(\text{см}^2 \cdot \text{град})$; $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $C = 0,39 \text{ Дж/}(\text{г} \cdot \text{град})$; $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$.

Решение. Постоянная времени нагрева по (1-21)

$$\tau_{\text{т}} = \frac{S\gamma C}{K_{\text{т}}\rho} = \frac{\pi d^2 \gamma C}{4K_{\text{т}}\pi d} = \frac{d\gamma C}{4K_{\text{т}}} = \frac{1 \cdot 8,9 \cdot 0,39}{4 \cdot 10^{-3}} = 865 \text{ с.}$$

Установившаяся температура нагрева по (1-20)

$$T_{\text{у}} = T_{\text{окр}} + I^2 \rho / (K_{\text{т}} \rho S) = 35 + \frac{500^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6}}{10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 1 (3,14 \cdot 1/4)} = 35 + 177 = 212^\circ\text{С.}$$

Нагрев за время $t = \tau_{\text{т}}$ по (1-28)

$$T = T_{\text{окр}} + \theta_{\text{у}} [1 - \exp(-t/\tau_{\text{т}})] = 35 + 177 (1 - e^{-1}) = 147^\circ\text{С.}$$

§ 1-4. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ДЛИТЕЛЬНЫЕ ТОКИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

К нормальным режимам работы аппаратов управления относятся режимы длительного прохождения номинального тока нагрузки и циклические режимы, когда периоды прохождения тока нагрузки $t_{\text{нр}}$ длительно чередуются паузами тока. В *кратковременном режиме* (рис. 1-12, а) в период паузы тока $t_{\text{п}}$ температура снижается до температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$. В *повторно-кратковременном режиме* (рис. 1-12, б) температура проводника в период паузы тока не успевает снизиться до $T_{\text{окр}}$. Встречается также *перемежающийся режим* (рис. 1-12, в), когда в период t_1 проходит ток I_1 , а в период t_2 — ток I_2 ($I_1 \neq I_2$).

Характерной величиной для повторно-кратковременного режима является относительная продолжительность включения:

$$ПВ = [t_{нр} / (t_{нр} + t_n)] 100\%, \quad (1-42)$$

отсюда

$$t_{нр} + t_n = (t_{нр} \cdot 100\%) / ПВ\%.$$

В трех указанных циклических режимах (рис. 1-12, а, б, в) также достигаются установившиеся максимальные температуры нагрева проводника. Для ее расчета определяют эквивалентный для данного режима ток, который, длительно проходя по проводнику, нагревает его до той же максимальной температуры, как и реальный ток в соответствии с режимом работы. Определим эквивалентные токи для этих режимов работы. Рассмотрим перемежающийся режим (рис. 1-12, в). В установившемся состоянии ($t > 4\tau_r$) температура перегрева имеет максимум θ_{max} и минимум θ_{min} . Если по проводнику длительно проходит ток I_1 , то установившаяся температура перегрева равна θ'_y . Аналогично току I_2 соответствует температура перегрева θ''_y . Таким образом, наблюдается установившийся режим, при котором температура проводника циклически изменяется от минимальной θ_{min} до максимальной θ_{max} , и наоборот. При этом θ_{max} и θ_{min} остаются постоянными.

Рассмотрим зависимость в установившемся режиме (участок CD на рис. 1-12, в). Для отрезка времени, когда проходит ток I_1 , в соответствии с выражением (1-19) справедлива зависимость

$$\theta_{max} = \theta'_y [1 - \exp(-t_1/\tau_r)] + \theta_{min} \exp(-t_1/\tau_r). \quad (1-43)$$

Для периода, когда проходит ток I_2 , соответствующая зависимость имеет вид

$$\theta_{min} = \theta''_y [1 - \exp(-t_2/\tau_r)] + \theta_{max} \exp(-t_2/\tau_r). \quad (1-44)$$

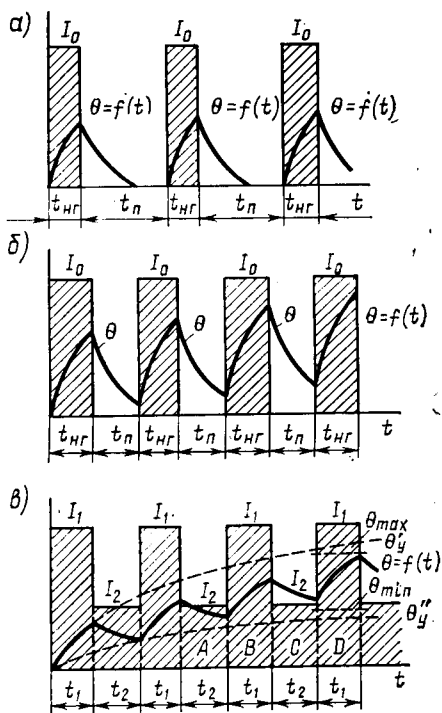


Рис. 1-12. Режимы работы аппаратов

При расчетах важно знать максимальную температуру перегрева $\theta_{\max}$, которая не должна превышать допустимую температуру перегрева. Поэтому исключим из зависимостей (1-43) и (1-44) величину $\theta_{\min}$. В результате

$$\theta_{\max} = \frac{\theta'_y [1 - \exp(-t_1/\tau_T)] + \theta''_y [\exp(-t_1/\tau_T) - \exp(-(t_1 + t_2)/\tau_T)]}{1 - \exp[-(t_1 + t_2)/\tau_T]}. \quad (1-45)$$

По формуле (1-20) для токов I_1 и I_2

$$\theta'_y = I_1^2 \rho_0 / (K_T p S) \text{ и } \theta''_y = I_2^2 \rho_0 / (K_T p S).$$

Используя эти выражения, находим

$$\theta_{\max} = \frac{\rho_0}{K_T p S} \times \frac{I_1^2 [1 - \exp(-t_1/\tau_T)] + I_2^2 [\exp(-t_1/\tau_T) - \exp[-(t_1 + t_2)/\tau_T]]}{1 - \exp[-(t_1 + t_2)/\tau_T]}. \quad (1-46)$$

Но по приведенному выше определению эквивалентного тока эта температура перегрева достигается при эквивалентном длительном токе $I_{\text{экв}}$. По выражению (1-20) $\theta_{\max} = I_{\text{экв}}^2 \rho_0 / (K_T p S)$.

Приравняв эти два выражения, для эквивалентного тока в перемежающемся режиме получим

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 [1 - \exp(-t_1/\tau_T)] + I_2^2 [\exp(-t_1/\tau_T) - \exp(-\frac{t_1 + t_2}{\tau_T})]}{1 - \exp[-(t_1 + t_2)/\tau_T]}}. \quad (1-47)$$

Зависимость (1-47) позволяет найти выражение для эквивалентного длительного тока в повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы.

Положив в (1-46) $I_2 = 0$, $I_1 = I_0$, $t_1 = t_{\text{нг}}$, $t_2 = t_{\text{п}}$ (рис. 1-12, б), получим формулу для эквивалентного длительного тока в повторно-кратковременном режиме:

$$I_{\text{экв}} = I_0 \sqrt{[1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)] / [1 - \exp[-(t_{\text{нг}} + t_{\text{п}})/\tau_T]]}. \quad (1-48)$$

Этой зависимости можно придать иной вид, если подставить в нее выражение (1-42):

$$I_{\text{экв}} = I_0 \sqrt{[1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)] / [1 - \exp[-t_{\text{нг}} \cdot 100\% / (\tau_T / \text{ПВ}\%)]]}. \quad (1-49)$$

Максимальная температура перегрева в повторно-кратковременном режиме исходя из формулы (1-46)

$$\theta_{\max} = \theta_y [1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)] / [1 - \exp[-t_{\text{нг}} \cdot 100\% / (\tau_T / \text{ПВ}\%)]], \quad (1-50)$$

где θ_y определяется по формуле (1-20).

Для кратковременного режима (рис. 1-12, а) (при $\theta_n = 0$) по (1-19)

$$\theta_{\max} = \theta_y [1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)]. \quad (1-51)$$

Эквивалентный длительный ток для кратковременного режима можно найти, используя зависимость (1-49), положив в ней $PB = 0$ (так как для этого режима $t_{\text{нг}} \ll t_{\text{нг}} + t_n$). В результате

$$I_{\text{экв}} = I_0 \sqrt{1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)}. \quad (1-52)$$

Для длительного режима ($t = \infty$) получаем $I_{\text{экв}} = I_0$, $T_{\max} = T_y$ вычисляется по (1-20).

Приведенные зависимости описывают процессы нагрева током элементарных токоведущих элементов. Более сложные условия нагрева характерны для комплектов аппаратов управления, в которых расположены рядом друг к другу различные элементы, обтекаемые токами.

На рис. 1-13, б изображены опытные кривые нагрева и охлаждения элементов пускателя и закрытого исполнения (с кожухом) — кривые изменения температуры внутренней 6 и наружной 7 сторон обмотки, магнитопровода 4, короткозамкнутого витка на полюсе электромагнита 5, в месте расположения токоведущих частей 3, на внутренней 2 и наружной 1 стенках металлического кожуха. Расположение этих элементов и областей в закрытом пускателе показано на рис. 1-13, а.

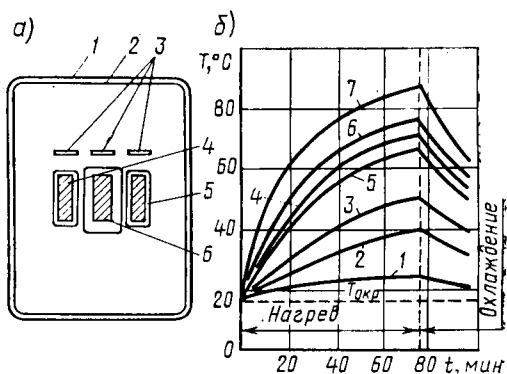


Рис. 1-13. Расположение элементов в пускателе ПМЕ (а) и кривые их нагрева (б)

и областей в закрытом пускателе показано на рис. 1-13, а.

Пример 1. Для условий примера 1 (см. § 1-3) найти эквивалентный длительный ток, если проводник при том же токе $I = 500$ А работает в повторно-кратковременном режиме при $PB = 60\%$ и времени нагрузки током $t_{\text{нг}} = 10$ мин.

Решение. Принимая $I_0 = 500$ А, по (1-48) находим

$$\begin{aligned} I_{\text{экв}} &= I_0 \sqrt{\frac{1 - \exp(-t_{\text{нг}}/\tau_T)}{1 - \exp(-t_{\text{нг}} \cdot 100\%/\tau_T PB\%)}} = \\ &= 500 \sqrt{\frac{1 - \exp(-10 \cdot 60/865)}{1 - \exp(-10 \cdot 60 \cdot 100/(865 \cdot 60))}} = 430 \text{ А.} \end{aligned}$$

§ 1-5. РАСЧЕТ КОНТАКТОВ

Контактирующие элементы аппаратов обычно изготавливают из чистых металлов, их сплавов или металлокерамики.

Медь — металл с хорошей электро- и теплопроводностью, но износостойкий. При температурах $\sim 200^\circ\text{C}$ образуется слой Cu_2O , толщина которого зависит от температуры нагрева и приобретает значение 10 — 1000 нм. При $T = 200 \div 400^\circ\text{C}$ образуется CuO и Cu_2O , а при $T > 400^\circ\text{C}$ — только CuO . Электрическая проводимость этих образований очень мала и сопротивление пленок может достигать 10^6 Ом, что резко ухудшает качество контактов.

Серебро — металл, обладающий аналогичными электро- и теплопроводящими свойствами; однако серебряный контакт значительно лучше медного, так как его окисные пленки разлагаются при повышенной температуре (Ag_2O — при $T > 180^\circ\text{C}$, AgO — при $T > 100^\circ\text{C}$) и контактирование происходит по чистому серебру. Контактные свойства металлов даны в табл. 1-3.

Металлокерамические материалы созданы с целью уменьшения износа от электрической дуги. Они изготавливаются, в частности, методами порошковой металлургии и представляют собой композицию обычно из двух-трех компонентов: один — из материала с высокой электропроводностью, другой — из тугоплавкого материала. Тугоплавкий компонент создает подобие решетки, поры которой заполнены материалом с высокой электропроводностью. При горении дуги этот материал плавится, но удерживается в порах решетки. После гашения дуги он снова застывает, вследствие чего объем улетучивающегося металла резко сокращается.

Широко применяется мелкодисперсная композиция $\text{Ag} - \text{CdO}$ (размеры частиц от 1 до 10 мкм, по массе 15% CdO и 85% Ag). Она отличается низким удельным электрическим сопротивлением и переходным сопротивлением контактов. Контакты не привариваются, хорошо обрабатываются резанием. Полагают, что при нагреве оксид кадмия взрывообразно располагается и возникающие пары способствуют гашению электрической дуги.

В композициях $\text{Ag} - \text{Ni}$ и $\text{Ag} - \text{W}$ содержится 40 — 50% W и Ni , остальное Ag . Эти материалы отличаются хорошей износостойкостью, но их удельное электрическое сопротивление и переходное сопротивление контактов высоки. Контакты имеют склонность к свариванию, плохо обрабатываются резанием; применяются в качестве разрывных контактов в аппаратах.

Металлокерамика $\text{Ag} - \text{CuO}$ — мелкодисперсная и представляет собой продукт окисления сплава серебра с медью. В результате обработки в среде кислорода при температуре порядка 1000 К образуется оксид меди. Получается контактный материал, состоящий из оксида меди (10%) и серебра (90%); имеет высокую износостойкость, пластичен, хорошо обрабатывается механически.

В композиции Ag — С (3% С, 97% Ag) нецелесообразно использовать мелкодисперсную структуру; при крупнодисперсной структуре (размер частиц 20 — 100 мкм) их износостойкость наиболее высокая. В композиции Ag — Ni — С целесообразна мелкая структура частиц Ag — Ni (основа) и крупная для частиц С. Свойства металлокерамических материалов даны в табл. 1-5.

Таблица 1-5

Марка	Состав, %	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·см	Твердость по Бринеллю, НВ	Плотность, г/см ³
КМК-00	100Ag	1,65	30—50	10,5
КМК-A10м	85Ag—15CdO	2,8	80—105	9,6— 9,9
КМК-A20м	90Ag—10CuO	2,5	55—75	9,4— 9,8
КМК-A30	70Ag—30Ni	3,0	55—75	9,4— 9,8
КМК-A30м	70Ag—30Ni	2,9	75—105	9,5—10
КМК-A31	60Ag—40Ni	4,5	60—80	9,3— 9,7
КМК-A31м	60Ag—40Ni	3,5	80—115	9,3— 9,8
КМК-A32	68Ag—29Ni—3C	4,5	45—65	8,5— 8,9
КМК-A33	69Ag—29Ni—2C	3,5	70—95	9,0— 9,5
КМК-A40	95Ag—3C	3,7	25—40	8,3— 8,7
КМК-A60	47Ag—50,5W—2,5Ni	4,1	120—160	13,3
КМК-A61	27Ag—69,5W—3,5Ni	4,5	170—210	15,0
КМК-B10	97Cu—3C	4,0	20—35	6,7— 7,3
КМК-B11	95Cu—5C	5,0	15—30	6,2— 6,8
КМК-B20	47Cu—50,5W—2,5Ni	6,0	120—150	12,0
КМК-B21	27Cu—69,5W—3,5Ni	7,0	170—200	14,0

Расчет контактов в режиме длительного прохождения тока сводится к определению силы P_k нажатия в контактах, при которой температура в месте контактирования не превышает допустимую. Она не должна превышать температуру рекристаллизации выбранного контактного материала (температура размягчения по табл. 1-3). Согласно ГОСТ 403 — 73 для контактов из меди установлена $T_{\text{доп}} = 105^\circ\text{C}$, а для контактов из серебра и материалов на его основе — до 200°C и ограничивается предельно допустимыми температурами соседних частей.

В переходном сопротивлении контактов R_k выделяется тепловая мощность P_k при прохождении тока I

$$P_k = R_k I^2. \quad (1-53)$$

Сопротивление R_k складывается из сопротивлений оксидных и других пленок в месте контактирования (α -пятна) и из сопротивления участков сужения линий тока от основного токоведущего сечения проводника S к α -пятнам, площадь которых значительно меньше S . Для аппаратов управления характерны сравнительно большие силы контактного нажатия, способные продавить поверхностные пленки; поэтому вторая слагающая переходного сопротивления в расчетах не учитывается.

Опытные зависимости переходного сопротивления разных материалов от силы контактного нажатия даны на рис. 1-14. Они относятся к торцовым контактам ($d = 25$ мм) и определены при токе 30 А.

Существует ряд зависимостей для определения R_k (Ом):

$$R_k = (\rho/2) \sqrt{\pi \sigma_{см} / (n P_k)}, \quad (1-54)$$

где P_k — контактное нажатие, Н; ρ — удельное электрическое сопротивление материала, Ом·см; n — минимальное количество α -пятен ($n = 1$ — для точечного контакта, $n = 2$ — для линейного контакта, $n = 3$ — для плоскостного контакта); $\sigma_{см}$ — сопротивление смятию (для меди равно 50 500 Н/см², для серебра — 30 300; для стали — 60 000; для никеля — 220 000; для вольфрама — 293 000)

$$R_k = \rho \sqrt{H_B / (0,1 P_k)}. \quad (1-55)$$

Твердость по Бринеллю H_B (Н/мм²) равна: Cu — 400 — 700, Al — 150 — 250, Fe — 600 — 800, Ni — 800, Pt — 550.

Эмпирическая формула для R_k (Ом):

$$R_k = K_1 [1 + (2/3) \alpha T] / (0,1 P_k)^m, \quad (1-56)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления, 1/град; T — температура нагрева контакта, °C; P_k — сила нажатия на контакт, Н; K_1 — коэффициент для разных контактных пар равный: Al — Al — 0,006; медь — латунь — 0,0004; алюминий — латунь — 0,0019; Cu — Cu — 0,0004; Al — Al — 0,001; Ag — Ag — 0,00006; латунь — латунь — 0,0007; Sn — Sn — 0,00048; m — коэффициент для разных видов контактирования: для плоскости — плоскости — 1,0; для шара — шара — 0,5; для линейного контакта — 0,7 — 0,8.

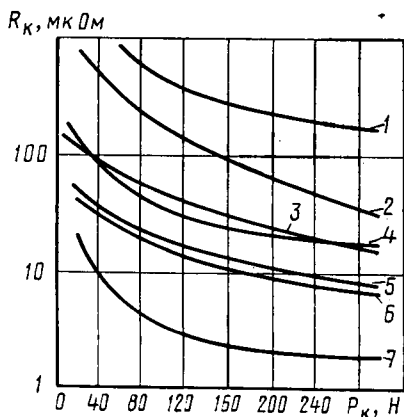


Рис. 1-14. Переходные сопротивления контактов из разных материалов в зависимости от силы контактного нажатия:

1 — графит; 2 — металлокомпозиция Ag(97%) + C(3%); 3 — Ag(60%) + Ni(40%); 4 — латунь; 5 — Ag(85%) + CdO(15%); 6 — медь; 7 — серебро

Температура нагрева T_m контактной точки выше температуры нагрева контактной детали $T_{к.д}$ (обычно на 5—15 град). Для определения T_m можно использовать одну из двух формул [4]: без учета теплоотвода с контакт-деталей в окружающую среду (формула Хольма)

$$T_m = T_{к.д} + R_k I^2 / (8 \lambda \rho); \quad (1-57)$$

с учетом теплоотвода с боковых поверхностей контакт-деталей в окружающую среду

$$T_m = T_{к.д} + R_k I^2 / (2 \sqrt{\lambda K_T \rho S}). \quad (1-58)$$

Температура контакт-деталей

$$T_{к.д} = T_{окр} + \rho I^2 / (K_T \rho S).$$

В этих формулах λ — коэффициент теплопроводности материала контакта, Вт/(см·град); K_T — коэффициент теплопередачи с поверхности, Вт/(см²·град) (см. § 1.3); ρ — периметр, см; S — площадь поперечного сечения контакт-деталей, см²; T — температура, °C; R_k — контактное сопротивление, Ом; I — ток, А.

Зависимости (1-54) — (1-58) позволяют найти силу нажатия в контактах P_k , при которой для заданного тока I , материала контакта с его физическими постоянными ρ , $\sigma_{см}$, $H_B \lambda$, размерами контакт-детали ρ , S , коэффициентом теплопередачи с поверхности K_T достигается заданная температура нагрева площадки контактирования T_m , не превышающая допустимую. Из этих зависимостей можно получить ряд обобщенных формул, определяющих взаимосвязь между *силой нажатия в контактах*, проходящим током и допустимой температурой их нагрева. Например, на основе (1-54) и (1-57) находим

$$P_k = \pi \sigma_{см} \rho I^2 / \{32 \lambda n (T_{доп} - T_{к.д})\}. \quad (1-59)$$

Здесь $T_{доп}$ — допустимая температура нагрева контактной точки, град; $T_{к.д}$ — температура контакт-детали, вычисляемая по (1-20).

В практике эксплуатации аппаратов установлены некоторые характерные удельные нажатия в контактах, отнесенные к 1 А длительного тока: для контактов из Ag, композиций Ag — CdO эти нажатия $\rho_{уд} = P_k / I = 0,07 \div 0,145$ Н/А; для медных контактов — 0,145 — 0,24, для командоаппаратов — 0,24 — 0,34.

Если напряжение на контактах обозначить $U_k = R_k I$, то из (1-54) и (1-57)

$$P_k = \pi \sigma_{см} \rho^2 I^2 / (4 n U_k^2). \quad (1-60)$$

Допустимое напряжение U_k можно выбрать по напряжению размягчения (рекристаллизация) материала U_1 (В): для Al — 0,1; для Ag — 0,09; для Ni — 0,22; для Au — 0,08; для Cu — 0,12; для

$W = 0,4$; для $Zn = 0,1$; для $Pt = 0,25$. Обычно допустимое напряжение на контактах $U_k \leq (0,1 \div 0,3) U_1$.

Кроме расчета из условий прохождения номинального тока контакты надо рассчитывать также из условия прохождения сверхтоков (перегрузки, токи короткого замыкания). Прохождение тока по контакту сопровождается появлением в них механических сил. При относительно небольших токах эти силы незначительны, при токах короткого замыкания они могут принимать высокие значения. Основные виды

этих сил: электродинамическая сила $P_{эд}$, сила электромагнитного сжатия $P_{пэ}$ (*пинч-эффекта*) и упругая сила взрыва паров металла $P_{в.м.}$.

Электродинамическая сила $P_{эд}$ (Н), вызывающая отталкивание контактов, возникает вследствие сужения линий тока в контакт-детали при подходе его к месту контактирования (рис. 1-15). Теоретическим путем найдена зависимость [2]:

$$P_{эд} = (\mu_0/4\pi) I^2 \ln(D/d_0), \quad (1-61)$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; I — ток, А; $P_{эд}$ — Н.

Сила электромагнитного сжатия $P_{эм}$ контактного перешейка возникает в связи с тем, что плотность магнитных силовых линий вокруг узкого перешейка диаметром d_0 существенно выше соответствующей плотности вокруг контакт-детали диаметром D . Магнитная индукция (Тл) вокруг участков проводника диаметрами D и d_0 (м) (рис. 1-15):

$$B_D = \mu_0 H_D = \mu_0 i / D\pi; \quad B_{d_0} = \mu_0 i / (\pi d_0).$$

Электромагнитное давление на поверхности проводника с равномерной плотностью тока в нем (Н/м²)

$$p_{эм} = B^2 / 2\mu_0, \quad (1-62)$$

на рассматриваемых участках

$$p_{эмD} = \mu_0 i^2 / (2\pi^2 D^2); \quad p_{эмd_0} = \mu_0 i^2 / (2\pi^2 d_0^2).$$

Соответствующая электромагнитная сила на единичной длине участков

$$P_{эмD} = \mu_0 i^2 / (2\pi D) \text{ и } P_{эмd_0} = \mu_0 i^2 / (2\pi d_0).$$

Из этих зависимостей получаем соотношение:

$$P_{эмD} / P_{эмd_0} = d_0^2 / D^2 \text{ и } P_{эмD} / P_{эмd_0} = d_0 / D. \quad (1-63)$$

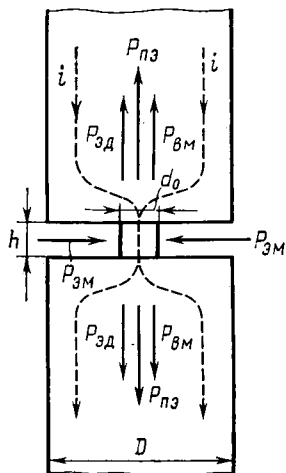


Рис. 1-15. Силы, действующие в контактах

участков проводника диаметрами D и d_0 (м) (рис. 1-15):

Чем меньше диаметр контактного перешейка d_0 , тем больше сжимающая его электромагнитная сила (при данном токе).

Эта сила сдавливает перешеек и вызывает появление в осевом направлении силы $P_{пэф}$ (пинч-эффекта). Под действием нагрева током перешеек теряет свою механическую прочность (например, плавится). Контакты могут разомкнуться силой $P_{пэф}$, выражаемой через коэффициент Пуассона σ_n и $P_{эм}$:

$$P_{пэф} = [\sigma_n / (1 - \sigma_n)] P_{эм} = [\sigma_n / (1 - \sigma_n)] \cdot [\mu_0 h / (\pi d_0)] i^2. \quad (1-64)$$

Коэффициент Пуассона характеризует взаимосвязь коэффициента упругости и продольной деформации материала при поперечном сжатии. Обычно длина металлического перешейка в контакте $h = 9,5 d_0$. Для твердых металлов: медь — $\sigma_n = 0,34$, серебро $\sigma_n = 0,36$.

Упругая сила взрыва паров металла $P_{в.м}$ возникает, если под действием тока расплавленный контактный перешеек переходит в парообразное состояние. Находясь в узком просвете между контакт-детальями, взорвавшиеся пары создают давление на контакты.

В приведенных формулах диаметр контактного перешейка d_0 (см) можно определить по силе нажатия в контактах P_k (Н) (создается контактной пружиной) и по сопротивлению материала смятию $\sigma_{см}$ (Н/см²):

$$d_0 = 2 \sqrt{P_k / (\pi \sigma_{см})}. \quad (1-65)$$

Для нормальной работы контактов необходимо, чтобы возникающие под действием тока силы не вызывали их самопроизвольного размыкания. Это достигается выбором необходимой силы контактной пружины, а в необходимых случаях — применением специальных компенсирующих устройств (см. гл. 4).

При токах короткого замыкания может произойти сваривание контактов и отказ аппарата в работе. Это наблюдается, когда температура замкнутых контактов достигает в месте их касания температуры плавления. На основе формулы Хольма (1-57) и зависимости (1-54) для переходного сопротивления контактов можно получить формулу для сваривающего тока:

$$I_{св} = \sqrt{32\lambda (T_{пл} - T_{к.д}) n P_k / (\pi \rho \sigma_{см})}, \quad (1-66)$$

где $T_{пл}$ и $T_{к.д}$ — температура плавления материала и температура контактной детали (обычно — это температура нагрева при номинальном токе), °С; P_k — сила контактного нажатия, Н; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(см · град); ρ — удельное сопротивление, Ом · см; $\sigma_{см}$ — сопротивление смятия контактного материала, Н/см²; n — минимальное число α -пятен в контакте ($\alpha = \parallel 1, 2$ или 3).

Зависимость (1-66) можно выразить относительно силы контактного нажатия, при которой не происходит сваривания контактов:

$$P_k > \pi \rho \sigma_{cm} I^2 / [32 \lambda n (T_{пл} - T_{к.л})]. \quad (1-67)$$

Формулы (1-66) и (1-67) действительны для установившегося режима протекания тока ($t = \infty$). В кратковременном режиме температура нагрева контактной точки зависит от времени прохождения тока. Найденная на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности, представленного в сферической системе координат, с учетом формулы (1-65) для размера площадки касания в контакте зависимость сваривающего тока $I_{св}$ (А) от силы контактного нажатия P_k (Н) и времени t (с) прохождения тока имеет вид

$$I_{св} = \sqrt{\frac{\lambda P_k (T_{пл} - T_0)}{0,1 \rho \sigma_{cm}}} \exp\left(\frac{c \gamma}{\lambda} \sqrt{\frac{P_k}{\pi \sigma_{cm} t}}\right). \quad (1-68)$$

Здесь T_0 — начальная температура контакта, которую можно вычислить по (1-57) или (1-58); c — теплоемкость, Дж/(г · град); γ — плотность, г/см³; λ — теплопроводность, Вт/(см · град); ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом · см; σ_{cm} — сопротивление материала смятию, Н/см².

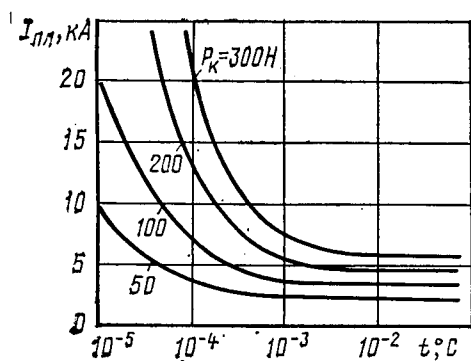


Рис. 1-16. Зависимость тока плавления медных контактов от времени его прохождения

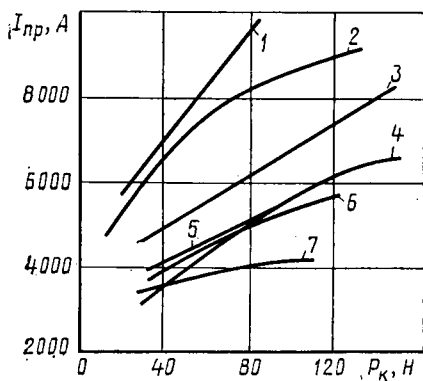


Рис. 1-17. Зависимости приваривающего тока разных материалов от силы контактного нажатия:

1 — Ag; 2 — Cu; 3 — Ag—CuO; 4 — Ag—CuO (мелкодисперсный); 5 — Ag—CdO; 6 — Ag—CdO (мелкодисперсный); 7 — Cu—C

Зависимости (1-67) и (1-68), полученные различными путями, удовлетворительно согласуются друг с другом: для установившегося режима ($t = \infty$) формула (1-68) практически переходит в (1-67).

На рис. 1-16 и 1-17 изображены зависимости, отражающие степень и характер влияния разных факторов на величины ми-

нимального плавящего тока (образует расплавленные точки в месте контакта) и минимального приваривающего тока (контакты свариваются).

Когда замкнутые контакты привариваются током, то после прекращения тока и остывания требуется определенная сила, чтобы разорвать сварившиеся контакты. Ее называют *силой сваривания*. На рис. 1-18 даны зависимости этой силы от контактного нажатия P_k , полученные при граничных значениях токов приваривания (ниже этих токов приваривание не наблюдается). При повышении температуры кипения, теплопроводности и теплоемкости контактного материала и при снижении катодного и анодного напряжения в дуге контакты свариваются меньше.

Пример 1. Для медного контакта, рассчитанного на номинальный ток $I_{ном}=100$ А, определить силу электродинамического отталкивания и силу пинч-эффекта при токе короткого замыкания $I_{к.з}=50$ кА.

Решение. Принимая плотность тока по медному проводнику равной 2 А/мм² (рис. 1-11), находим сечение и диаметр D токоведущей части:

$$S = I_{ном}/j = 100/2 = 50 \text{ мм}^2; D = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 50/3,14} = 8 \text{ мм.}$$

Принимая удельное нажатие в медных контактах $P_{уд}=0,15$ Н/А, находим силу нажатия в контактах P_k и по (1-65) диаметр d_0 мостика:

$$P_k = P_{уд} I_{ном} = 0,15 \cdot 100 = 15 \text{ Н;}$$

$$d_0 = 2 \sqrt{P_k/(\pi \sigma_{см})} = 2 \sqrt{15/(3,14 \cdot 50 \cdot 500)} = 0,01 \text{ см.}$$

Электродинамическая сила по (1-61)

$$P_{эд} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{к.з}^2 \ln \frac{D}{d_0} = \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 000^2}{4 \cdot 3,14} \ln \frac{8}{0,1} = 1450 \text{ Н.}$$

Сила пинч-эффекта по (1-64) для нерасплавленного мостика (при $h = 0,5 d_0$)

$$P_{пэф} = \frac{\sigma_{п}}{1 - \sigma_{п}} \cdot \frac{\mu_0 h}{\pi d_0} I_{к.з}^2 = \frac{0,34}{1 - 0,34} \cdot \frac{1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 d_0}{3,14 d_0} (50 \cdot 000)^2 = 287 \text{ Н.}$$

Пример 2. Для медного контакта при силе нажатия $P_k = 100$ Н найти величину приваривающего тока при времени его протекания $t = 10^{-4}$ с и установившемся режиме ($t = \infty$). Данные: $\lambda = 3,8$ Вт/(см·град), $c = 0,39$ Дж/(г·град); $\rho = 1,75 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, $\sigma_{см} = 50 \cdot 000$ Н/см²; $\gamma = 8,9$ г/см³; $T_{пл} = 1083^\circ\text{C}$.

Решение. Начальную температуру принимаем допустимой $T_0 = 105^\circ\text{C}$ (для изоляции класса А).

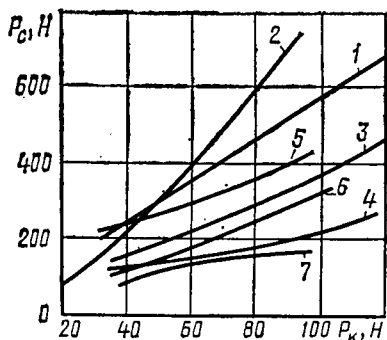


Рис. 1-18. Зависимость силы сваривания от контактного нажатия.

Обозначения см. на рис. 1-17

По (1-68) находим для $t = 10^{-4}$ С:

$$I_{\text{св}} = \sqrt{[\lambda (T_{\text{пл}} - T_0) P_{\text{к}} / 0,1 \rho \sigma_{\text{см}}] \exp \left(\frac{c \gamma}{\lambda} \sqrt{P_{\text{к}} / \pi \sigma_{\text{см}} t} \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{3,8 (1083 - 105) 100}{0,1 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 500} \exp \left(\frac{0,39 \cdot 8,9}{3,8} \sqrt{\frac{100}{3,14 \cdot 50 \cdot 500 \cdot 10^{-4}}} \right)} = 20 \cdot 300 \text{ А.}$$

По (1-66) для $t = \infty$

$$I_{\text{св}} = \sqrt{32 \lambda (T_{\text{пл}} - T_0) P_{\text{к}} / (\pi \rho \sigma_{\text{см}})} = \sqrt{\frac{32 \cdot 3,8 (1083 - 105) 100}{3,14 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 500}} = 6600 \text{ А.}$$

§ 1-6. СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА И КОЭФФИЦИЕНТ АМПЛИТУДЫ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ

Собственная частота отключаемой цепи f_0 по (1-13) и коэффициент амплитуды K_a по (1-11) позволяют определить скорость восстановления напряжения на коммутирующем элементе аппарата (1-12) и, следовательно, жесткость цепи по отношению к аппарату: чем выше f_0 и K_a , тем тяжелее условия отключения цепи с током. Коэффициент амплитуды K_a , определяющий степень затухания кривой восстанавливающегося напряжения U_v , существенно зависит также от самого отключающего аппарата. Его остаточное сопротивление в стадии образования диэлектрических свойств коммутирующего элемента за нулевым значением тока демпфирует восстанавливающее напряжение. Собственная частота f_0 — это частота колебаний в затухающей кривой восстанавливающегося напряжения. Эти два параметра трудно определить расчетным путем K_a из-за невозможности рассчитать остаточное сопротивление коммутирующего элемента аппарата в стадии восстановления его диэлектрических свойств, f_0 вследствие трудности определения эквивалентной емкости схемы. Реальные промышленные сети имеют сложную конфигурацию и емкости их элементов являются распределенными. Для определения f_0 надо находить эквивалентную емкость, приведенную к выводам аппарата. Поэтому для определения значений f_0 и K_a обычно проводят эксперименты.

Для определения f_0 и K_a в установках низкого напряжения применимы два метода. В первом методе включается выпрямитель в разрыв одной из фаз, например игнитрон (рис. 1-19, а). В конце проводящего полупериода игнитрон I запирается и на нем восстанавливается напряжение источника (рис. 1-19, б). Процесс этот циклически повторяется и на экране осциллографа фиксируется кривая восстанавливающегося напряжения U_v с присущей ей собственной частотой колебаний f_0 и с затуханием, характеризуемым коэффициентом K_a . Тиратрон T ис-

пользуется для зажигания игнитрона I или для самостоятельного проведения небольших токов нагрузки во время опыта (при выключенном рубильнике P).

Для измерения собственной частоты можно использовать как выпрямитель на большие токи (игнитрон), так и слаботочный выпрямитель, например тиратрон T при условии введения в цепь дополнительного резистора $R1$ для ограничения тока до допустимого для тиратрона. Но в этом случае возникают трудности в наблюдении кривой $U_{\text{в}}$ на экране осциллографа вследствие уменьшения угла сдвига фаз между током и напряжением. В рассмотренном методе надо применять выпрямители с большим и быстро восстанавливающимся обратным сопротивлением, чтобы оно не влияло на кривую $U_{\text{в}}$, не демпфировало процесс. В сетях частотой 50 Гц для этой цели пригодны тиратроны с ртутным и водородным наполнением. В высокочастотных цепях наиболее применимы вакуумные приборы — кенотроны. Силовые полупроводниковые диоды нежелательны для применения, так как они искажают результат измерения вследствие присущей им собственной емкости и явлений перераспределения носителей электричества в p - n -переходах в нулевую паузу тока.

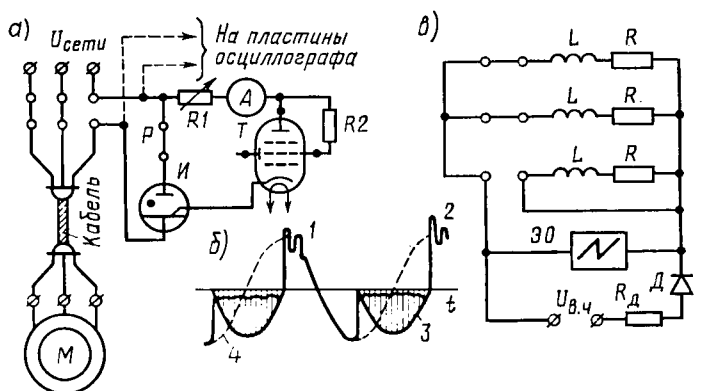


Рис. 1-19. Методы измерения собственной частоты отключаемой цепи низкого напряжения:

1, 2 — восстанавливающееся напряжение; 3 — полуволна тока; 4 — напряжение сети

Второй метод измерения параметров f_0 и K_a требует обесточивания электрической сети (рис. 1-19, в). От источника высокой частоты $U_{\text{в.ч}}$ через выпрямитель D в цепь контура посылаются однополярные полуволны тока. Переходный колебательный процесс в цепи, возникающий в конце полуволны тока, проходит с собственной частотой цепи f_0 и соответствующей степенью затухания, характеризуемой K_a . Этот процесс фиксируется на электронно-лучевом осциллографе ЭО. Рекомендуется частоту источника $U_{\text{в.ч}}$ выбирать в зависимости от отключаемого тока контура: при $I \leq 1000$ А брать 2 кГц, при $I \geq 1000$ А — 4 кГц.

Однако при всех условиях она не должна составлять более 10% измеряемой собственной частоты. В цепь вспомогательного источника $U_{в.ч}$ включается дополнительный резистор $R_d \gg \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, где $\omega = 2\pi \cdot 2000$ — для частоты 2 кГц ($I \leq 1000$ А); $\omega = 2\pi \cdot 4000$ — для частоты 4 кГц ($I \geq 1000$ А).

Электронно-лучевой осциллограф ЭО фиксирует U_v на элементах нагрузки контура, которое при указанных соотношениях сопротивлений наблюдается вблизи амплитудного значения напряжения на индуктивность, т. е. в наиболее благоприятных условиях для получения отчетливого изображения кривой U_v на экране осциллографа. Параметры схемы вспомогательного источника $U_{в.ч}$ должны быть такими, чтобы падение напряжения на нагрузке (R и L) при измерениях составляло примерно 20 В. В качестве выпрямителей D рекомендуется применить кенотроны.

На рис. 1-20 даны опытные зависимости собственной частоты f_0 от номинальной мощности двигателей $P_{ном}$ при их отключении в условиях кабельных и воздушных сетей (шинопроводы и провода крепятся на изоляторах).

Собственная частота при отключении двигателей, работающих в кабельных сетях, значительно ниже собственной частоты, относящейся к условиям отключения двигателей в воздушно-кабельных сетях. Это объясняется влиянием емкости линий — в кабельных линиях она больше, чем в воздушных. Значительный разброс значений f_0 объясняется рядом причин: разными нагруз-

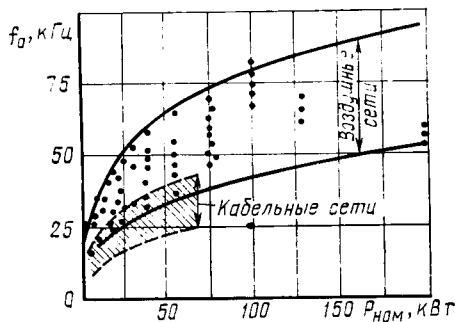


Рис. 1-20. Зависимость собственной частоты от номинальной мощности двигателей при напряжении 380 В

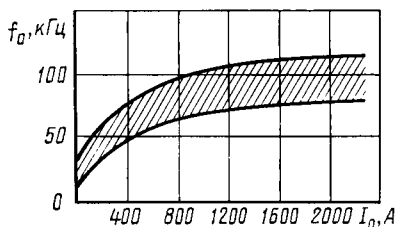


Рис. 1-21. Зависимость частоты f_0 от отключаемого тока I_0

ками двигателей, протяженностью линий, конструкцией двигателей, разновидностями питающей сети цехов (разветвленные или сосредоточенные).

Зависимость собственной частоты f_0 от отключаемого тока I_0 дана на рис. 1-21. Изображены верхняя и нижняя границы значений f_0 , измеренных разными способами, в неодинаковых условиях опыта. Увеличение f_0 с ростом тока объясняется сни-

жением индуктивности L цепи, входящей в зависимость (1-13) для f_0 . Увеличение тока при неизменном напряжении источника вызывается снижением полного сопротивления $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ и соответственно индуктивности L (в типичных условиях относительно небольшого изменения коэффициента мощности). Для однофазной цепи с током I_0 , напряжением $U_{\text{ном}}$ и заданным $\cos \varphi$ справедливы соотношения:

$$\sin \varphi = X/Z = \omega L I_0 / U_{\text{ном}};$$

$$L = U_{\text{ном}} \sin \varphi / \omega I_0 = (U_{\text{ном}} / \omega I_0) \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}.$$

Подставив L в (1-13), получим

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{\omega I_0 / (C U_{\text{ном}} \sin \varphi)},$$

Отсюда видно, что в заданных условиях с ростом напряжения сети $U_{\text{ном}}$ частота f_0 уменьшается. Действительно, при напряжениях до 1000 В частота f_0 имеет порядок десятков кГц, а в сетях напряжением в десятки — сотни киловольт она измеряется только сотнями герц.

Для условий испытания аппаратов на отключение номинальных токов регламентируется собственная частота испытательных контуров [3]:

$$f_0 = 2000 I_0^{0.2} U_{\text{ном}}^{-0.8}. \quad (1-69)$$

Неодинаковые показатели степени у I_0 и $U_{\text{ном}}$ в (1-69) объясняются разной степенью изменения емкости сетей C и $\sin \varphi$ при росте I_0 и $U_{\text{ном}}$.

На рис. 1-22 даны зависимости f_0 от расстояния l между отключающим аппаратом и отключаемым объектом в электрической схеме. Кривая 1 характерна для условий короткого замыкания сети в разных точках шинпровода (под 1 понимается расстояние между точкой включения игнитрона и закороткой в цепи); 2 — условия замыкания в отпайках от шинпровода; 3 — условия трансформаторной нагрузки; 4 — двигатель мощностью 40 кВт; 5 — двигатель мощностью 7 кВт; 6 — условия отключения обмотки пускателя серии ППО. Падающий характер зависимостей $f_0 = f(l)$ объясняется увеличением емкости, приведенной к аппарату, и индуктивности с ростом длины линий, расположенных по схеме за отключающим аппаратом.

Аппараты управления на небольшие номинальные токи могут коммутировать цепи обмоток электромагнитов, в том числе приводов других аппаратов. При отключении тока в таких цепях собственная частота зависит от параметров магнитной системы. Собственная частота в цепях обмоток электромагнитов при притяннутом состоянии якоря измеряется единицами килогерц. О степени влияния основных размеров магнитной цепи электро-

магнита на собственную частоту можно судить по рис. 1-23, где изображены зависимости f_0 от отношения сечения магнитопровода S_M к его длине l_M для магнитопровода втягивающего электромагнита контактора типа КТ (кривая 2). Для тех же условий дана зависимость f_0 от величины воздушного зазора δ в магнитной цепи (кривая 1).

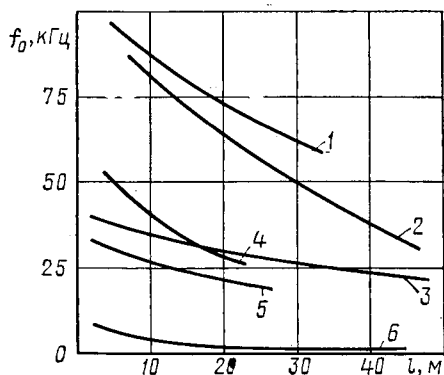


Рис. 1-22. Зависимость частоты f_0 от расстояния l

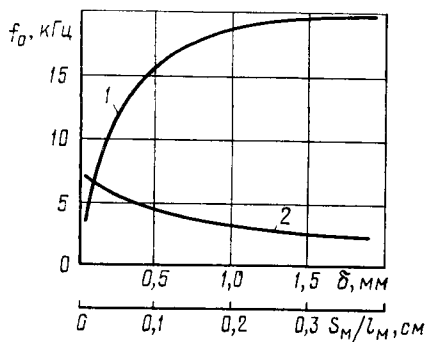


Рис. 1-23. Зависимость частоты f_0 от параметров магнитной цепи (δ и S_M/l_M)

Зависимости (рис. 1-23) можно объяснить на основе простых математических соотношений. Известно, что индуктивность электромагнита в простейших условиях

$$L = \omega^2 / R_M, \quad (1.70)$$

где ω — число витков обмотки.

Магнитное сопротивление магнитной цепи

$$R_M = [l_M / (\mu S_M)] + \delta / (\mu_0 S), \quad (1.71)$$

где l_M и δ — длина стального магнитопровода и воздушного зазора; μ и μ_0 — магнитная проницаемость стали и воздуха; S_M и S — площади поперечного сечения магнитопровода и воздушного зазора.

Если $S_M = S$, то (1.70) с учетом (1.71) приобретает вид

$$L = \omega^2 S / [(l_c / \mu) + (\delta / \mu_0)].$$

Подставив ее в формулу (1-13) для собственной частоты, получим [4]:

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{[(l_c / \mu) + (\delta / \mu_0)] / (C \omega^2 S)}. \quad (1.72)$$

На рис. (1-24) даны опытные значения коэффициента амплитуды K_a при разных токах, имеющего очень большой разброс опытных значений. Это объясняется, вероятно, значительным различием величин остаточной проводимости контактных промежутков аппаратов при различных опытах и их влиянием на K_a . При расчетах восстанавливающегося напряжения на контактах аппаратов управления принято считать, что наиболее типичные значения K_a находятся в пределах $K_a = 1,1 \div 1,5$.

При исследовании процессов восстановления напряжения при отключении короткозамкнутых сетей низкого напряжения обнаружены две типичные формы кривой U_b : одночастотная кривая (рис. 1-25, а) и двухчастотная кривая (рис. 1-25, б). Одночастотная кривая U_b наблюдается при отключении короткозамкнутых сетей и трансформаторов с изолированной нейтралью. В сетях с заземленной нейтралью имеются пути для замыкания токов нулевой последовательности, поэто-

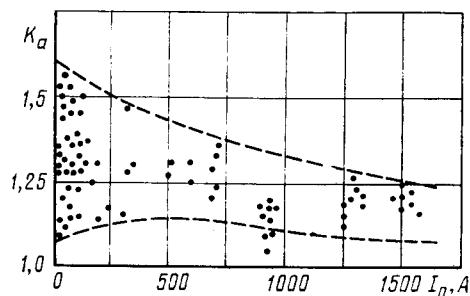


Рис. 1-24. Область опытных значений коэффициента амплитуды

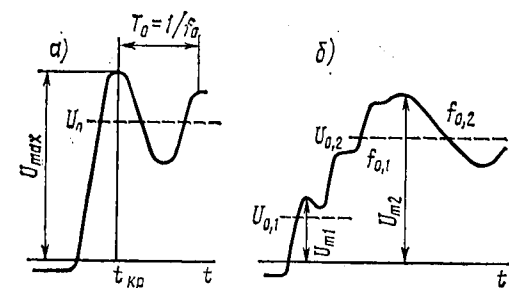


Рис. 1-25. Типичные кривые восстанавливающегося напряжения

му при отключении коротких замыканий появляется вторая частота в кривой восстанавливающегося напряжения. Собственная частота для одночастотной кривой U_b составляет 60 — 100 кГц, для двухчастотной — низкочастотной составляющей — 20 — 40, а для высокочастотной — 70 — 120.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ И РЕЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

§ 2-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ

В электроприводе муфты представляют собой устройства для соединения и разъединения ведущего и ведомого валов привода без остановки вращения ведущего вала. Существуют три основные разновидности электромагнитных муфт — фрикционные, ферропорошковые и гистерезисные. Электромагнитные муфты получили широкое применение вследствие их преимуществ: они удобны в эксплуатации, имеют малое время срабатывания и небольшие габариты, передают большие мощности на валу при сравнительно малых затратах мощности на управление, т. е. обладают высоким коэффициентом управления, равным отношению указанных мощностей.

Фрикционные муфты (муфты трения) обычно изготавливаются в многодисковом исполнении. На рис. 2-1, а представлена конструктивная схема одной из разновидностей многодисковых муфт для включенного состояния. Проходящий по обмотке 9 ток

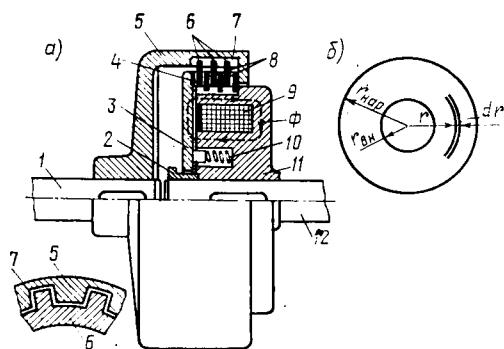


Рис. 2-1. Электромагнитная фрикционная муфта

создает магнитный поток, замыкающийся через якорь 3. Якорь может перемещаться в осевом направлении по втулке 2. Когда якорь притягивается к магнитопроводу, он своей верхней частью прижимает диски 6 и 8 друг к другу и тем самым вводит ведомую часть муфты в зацепление с ведущей частью за счет сил трения, возникающих на боковых поверхностях дисков. Верхние диски 6 связаны с ведущей ча-

стью муфты 5, укрепленной на валу 1. Эти диски имеют зубцы, которые входят во внутренние продольные пазы 7 и создают механическую связь дисков с деталью 5. Нижние фрикционные диски 8 имеют такую же связь через аналогичные зубцы и пазы 4 на корпусе муфты, связанном с ведомым валом 12. Та-

ким образом, если диски 6 и 8 плотно прижать друг к другу, то ведущая и ведомая части муфты войдут в зацепление.

Напряжение на обмотку муфты подается через контактные кольца (на рисунке они не показаны). При снятии напряжения с обмотки муфты электромагнитная сила исчезает и якорь 3 перемещается влево под действием возвратных пружин 10, фиксированных на выступах 11. Силы трения между боковыми поверхностями дисков 6 и 8 исчезают и муфта выходит из зацепления.

Реверсивные муфты позволяют изменять направление вращения ведомого вала. В таких системах имеются два ведущих вала, вращающихся в разные стороны. Если подать напряжение на обмотку первой ведущей системы, то якорь муфты переместится в одну сторону и введет ведомую часть в зацепление с первым ведущим валом. Если подать напряжение на обмотку второй ведущей системы, то якорь переместится в другую сторону и введет ведомую часть в зацепление со вторым ведущим валом, при этом направление вращения изменится на противоположное. На основе такой системы можно осуществить муфту-тормоз. Для этого надо вместо одной из ведущих частей иметь неподвижную систему с обмоткой. При подаче напряжения на эту обмотку якорь притягивается к неподвижной системе и ведомая часть затормаживается.

Магнитопроводы муфт обычно изготавливают из магнитно-мягкого материала. Если обмотка муфты питается переменным током, то магнитопровод изготавливают из шихтованной электро-технической стали разных марок с толщиной листа от 0,35 до 1,0 мм или из легированной стали. Возможно использование магнитодиэлектриков (ферритов) для изготовления магнитопроводов муфт переменного тока. Очень высокое удельное электрическое сопротивление ферритов (в 10^6 раз выше, чем у стали) практически полностью исключает потери от вихревых токов.

Фрикционные диски электромагнитных муфт (поверхности трения) изготавливают из изнаноустойчивых материалов с большим коэффициентом трения. Могут использоваться также обычные материалы: сталь по стали, сталь по чугуноу, сталь по бронзе, бронза по бронзе и т. п. Наиболее совершенными для поверхностей трения следует считать металлокерамические материалы, например, следующего состава (% по массе): медь — 68, олово — 8, свинец — 7, графит — 6, кремний — 4, железо — 7. Равномерная смесь порошков этих компонентов прессуется при давлении около 10^8 Па и затем спекается при температуре 700—800° С. Легкоплавкие компоненты (олово, свинец) проникают в поры смеси и спаивают весь состав. Металлокерамические фрикционные диски работают плавно, без заеданий и допускают высокую местную температуру нагрева (обычно температура не должна превышать 200° С). Коэффициент трения таких дисков зависит от температуры: при комнатной темпера-

туре $K_{тр} = 0,4$, при $T = 100^\circ \text{C}$ $K_{тр} = 0,32$, а при $T = 400^\circ \text{C}$ $K_{тр} = 0,26$.

Важным параметром материалов, используемых для поверхностей трения, является *допустимое удельное давление* $p_{уд}$ на фрикционные поверхности. Для металлокерамических материалов оно составляет около 10^6 Па, а для сталей — около $5 \cdot 10^5$ Па.

Фрикционные диски должны иметь допуски на неплоскостность не более 0,02 мм и на непараллельность поверхностей трения не более 0,03 мм. Указанные требования определяют достаточно трудоемкую технологию изготовления этих дисков.

Для расчета электромагнитной муфты трения должен быть задан ее номинальный момент $M_{ном}$. Расчетный момент муфты $M_p = K_3 M_{ном}$.

Коэффициент запаса K_3 по крутящему моменту для разных видов нагрузки равен: для металлорежущих станков 1,25—2,5, для кранов, подъемников 3—5, для центробежных насосов 2—3, для воздуходувок 1,25—2,0, для мельниц, дробилок 4,0.

Поверхности трения фрикционных дисков (рис. 2-1, б) представляются в виде круговых с наружным $r_{нар}$ и внутренним $r_{вт}$ радиусами. Выделим на такой поверхности на расстоянии r от центра элементарный круг шириной dr . Тогда элементарный момент, приходящийся на эту площадь, $dM = K_{тр} p_{уд} 2\pi r^2 dr$, где $K_{тр}$ — коэффициент трения; $p_{уд}$ — удельное давление на единицу площади.

Результирующий момент на поверхность трения одного диска муфты

$$M_0 = \int_{r_{вт}}^{r_{нар}} dM = 2\pi K_{тр} p_{уд} (r_{нар}^3 - r_{вт}^3)/3.$$

Отношение $\beta = r_{вт}/r_{нар}$ для определенных разновидностей муфты обычно составляет 0,3—0,8. Вводя β в предыдущую зависимость, получим

$$M_0 = 2\pi K_{тр} p_{уд} r_{нар}^3 (1 - \beta^3)/3. \quad (2-1)$$

Момент муфты с n поверхностями трения ($n + 1$ дисков)

$$M_2 = n M_0 = 2\pi K_{тр} p_{уд} r_{нар}^3 (1 - \beta^3) n/3.$$

Отсюда *наружный радиус поверхности трения*

$$r_{нар} = \sqrt[3]{3K_3 M_{ном} / [2\pi n K_{тр} p_{уд} (1 - \beta^3)]}. \quad (2-2)$$

По известным размерам поверхности трения при заданной удельной силе нажатия в дисках трения рассчитываются параметры электромагнитной системы муфты. При прохождении тока по обмотке возникает магнитный поток, который развивает в воздушном зазоре механическую силу притяжения якоря

к полюсам магнитопровода. Эту силу принято называть электромагнитной. Электромагнитная сила определяется по формуле, полученной на основе энергетических соотношений и называемой энергетической (Н):

$$P_{эм} = - (1/2) (IW)_{\delta} dG_{\delta}/d\delta, \quad (2-3)$$

где $(IW)_{\delta}$ — часть магнитодвижущей силы (МДС) обмотки, приходящаяся на рабочий воздушный зазор, А; G_{δ} — магнитная проводимость рабочего воздушного зазора, Гн; δ — рабочий воздушный зазор, м; производная $|dG_{\delta}/d\delta|$ — Гн/м.

В равномерном магнитном поле, когда площадь полюса $S \gg \delta^2$, проводимость рабочего зазора (Гн)

$$G_{\delta} \approx \mu_0 S/\delta.$$

С учетом этой зависимости, а также формулы

$$P_{\delta} = (IW)_{\delta} = \Phi_{\delta}/G_{\delta} = B_{\delta}\delta/G_{\delta}$$

находим формулу для электромагнитной силы (Н):

$$P_m = \Phi_{\delta}^2/2\mu_0 S = B_{\delta}^2 S/2\mu_0. \quad (2-4)$$

Здесь Φ_{δ} — магнитный поток, Вб; B_{δ} — магнитная индукция в рабочем зазоре, Тл; S — площадь полюса, м²; $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

Зависимость (2-4) принято называть *формулой Максвелла*. Для силы магнитного взаимодействия в двух средах эта формула имеет вид (Н) в записи, впервые данной Максвеллом:

$$P_{эм} = [(\mu_2 - \mu_1)/(2\mu_1\mu_2)] (SB^2 \cos \alpha) [1 + (\mu_2/\mu_1) \operatorname{tg}^2 \alpha], \quad (2-5)$$

где μ_1 и μ_2 — магнитные проницаемости сред (воздуха и железа), Гн/м; S — площадь поверхности раздела сред, м²; B — магнитная индукция в первой среде, Тл; α — угол между направлением вектора индукции в первой среде и нормалью к поверхности раздела двух сред.

Применительно к стальному полюсу электромагнита в ненапряженном состоянии, когда магнитное сопротивление стали можно считать равным нулю ($\alpha \approx 90^\circ$) и $\mu_2 = \mu_{ст} \gg \mu_1 = \mu_0$, формула (2-5) преобразуется в (2-4).

В отключенном состоянии муфта обладает некоторым остаточным моментом, обусловленным трением дисков вследствие их неплоскостности, остаточным намагничиванием стали и др. В реальных муфтах этот момент незначителен (1—10 Н·см).

Переходный режим включения электромагнитной муфты складывается из трех основных этапов. Первый этап начинается с момента подачи напряжения на обмотку муфты и заканчивается моментом трогания якоря муфты. На втором этапе якорь муфты притягивается к полюсам электромагнитной системы. Третий этап

начинается с момента соприкосновения поверхностей трения и заканчивается, когда происходит полное их сцепление. На этом этапе наблюдается проскальзывание поверхностей трения. Скорость вращения ведущего двигателя уменьшается, пока не сравняются скорости вращения нагрузки и двигателя. Расчет продолжительности первого и второго этапов проводится обычными методами расчета времени срабатывания электромагнитов. Продолжительность третьего этапа определяется на основе решения дифференциальных уравнений, учитывающих характеристики электропривода и механической нагрузки.

Ферропорошковые муфты основаны на использовании способности ферромагнитной смеси затвердевать в магнитном поле. Рассмотрим две стальные детали с обращенными друг к другу плоскими поверхностями, между которыми имеется небольшой воздушный зазор. Одна деталь жестко связана с ведущим, другая с ведомым валами привода. Если пространство между плоскими поверхностями заполняется мелким ферромагнитным порошком, то при наличии магнитного поля в воздушном зазоре частицы порошка образуют механические цепочки — связки, которые создают силу сцепления одной детали с другой. В результате вращение от ведущего вала передается к ведомому.

При снятии магнитного поля связки распадаются, механическая связь между ведущей и ведомой частями нарушается и ведомая система перестает вращаться.

Наличие ферромагнитного порошка приводит к необходимости создавать соответствующие уплотнения, чтобы порошок не выходил за пределы рабочих зазоров. Частицы порошка, попавшие в подшипники, приводят их к разрушению. Поэтому кроме уплотнений устанавливаются магнитные ловушки на валу — постоянные магниты, к которым притягиваются частицы ферромагнитного порошка, вышедшие из муфты.

В ферропорошковых муфтах используется порошок карбонильного, вихревого или кремнистого железа, а также порошки оксиферов (ферритов). Зерна имеют правильную сферическую форму (диаметр частиц — порядка 10 мкм). Порошок карбонильного железа получают путем разложения пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5 = \text{Fe} + 5\text{CO}$, являющегося продуктом воздействия оксида углерода на железо при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ и давлении $p = 150 \cdot 10^5$ Па. Это жидкость с температурами кипения ($+102,7^\circ\text{C}$) и затвердения (-20°C). Если пары $\text{Fe}(\text{CO})_5$ пропускать через камеру, нагретую до $200-250^\circ\text{C}$, то образуется порошкообразное железо. Для повышения коррозионной стойкости частицы ферромагнитного порошка могут покрываться тонкой пленкой (доли микрон) SiO_2 и Al_2O_3 .

Ферромагнитный порошок обычно применяется в равномерной смеси с разделителем — графитом, оксидом цинка, двуоксидом кремния, тальком или другими веществами (например,

20 ч. железа и 1 ч. разделителя). Он предназначен для разделения частиц порошка, а также для предохранения их от слипания и комкования. В ферропорошковых муфтах может использоваться также смесь ферромагнитного порошка с минеральным маслом или кремнийорганической жидкостью. Муфты с жидким разделителем неудобны в эксплуатации и сложны в изготовлении вследствие необходимости надежной герметизации смеси. Поэтому более широко распространены муфты с сухими разделителями.

Сила механической связи между частями муфты зависит от степени заполнения зазора ферромагнитным порошком. Оптимальные условия достигаются при средних величинах зазора: $\delta = 0,8 \div 1,2$ мм. Однако оптимальная величина зазора зависит от размера частиц порошка. Так, для грубого магнитного порошка с диаметром частиц 100—200 мкм величина зазора $\delta = 1,5 \div 2,5$ мм, а для порошка с диаметром частиц 10 мкм величина зазора $\delta = 0,8 \div 1,2$ мм.

Сила трения, возникающая на единице поверхности касания затвердевшего ферромагнитного порошка, при индукции магнитного поля

$$P_0 = K_{т.з} B^2 / (2\mu_0 \mu_c),$$

где $K_{т.з}$ — эквивалентный коэффициент трения; μ_0 и μ_c — магнитная проницаемость вакуума и относительная проницаемость ферропорошковой смеси.

Повышение частоты вращения муфты приводит к увеличению центробежных сил, воздействующих на возникающие в них ферромагнитные связки. При больших частотах вращения частицы ферромагнитного порошка могут переместиться к периферии зазора и заклинить муфту. Поэтому работа ферропорошковых муфт на частотах более 3000 мин⁻¹ не допускается.

Ферропорошковые муфты имеют ряд преимуществ перед электромагнитными муфтами трения: меньшую мощность управления, время срабатывания на порядок величины (~ в 10 раз) меньше, отсутствие поверхностей трения, подверженных механическому износу, и т. п. Но при одинаковых передаваемых мощностях габариты и масса ферропорошковых муфт больше, чем фрикционных. Ферропорошковые муфты целесообразно применять, когда по условиям работы требуется большая частота переключений и высокое быстродействие. Большим преимуществом ферропорошковых муфт является отсутствие изнашиваемых элементов, например, таких, как диски трения во фрикционных муфтах.

В гистерезисных муфтах передача вращающего момента осуществляется посредством взаимодействия между магнитным полем индуктора, связанного с ведомым валом, и намагниченными в этом поле участками магнитно-твердого материала (активный слой), связанными с ведущим валом. Рассмотрим вариант

такой муфты, изображенной на рис. 2-2, а. С ведущим валом 8 связаны детали 1, 2, 3 и 4, с ведомым валом 7 — детали 5 и 6.

Ток в обмотке 1 создает магнитный поток Φ , замыкающийся через основной магнитопровод 2, имеющий ряд выступающих полюсов; через гистерезисные диски 5 из магнитно-твердого материала, связанные с ведущим валом 7; через ферромагнитные зубчатые диски 4, установленные на изолирующей детали 3, которая укреплена на основном магнитопроводе 2.

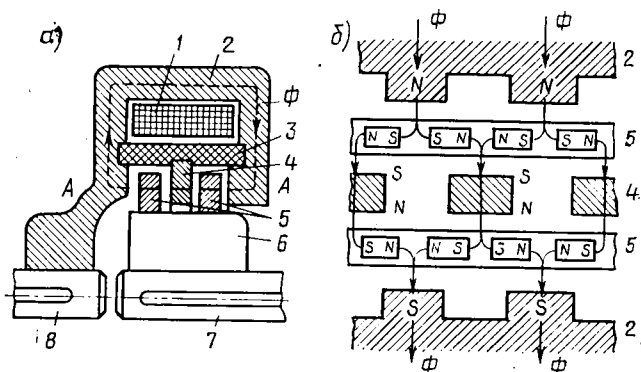


Рис. 2-2. Гистерезисная муфта

Если поверхности концентрических деталей муфты, соответствующие сечению А—А, развернуть на плоскости, то получим изображение (рис. 2-6, б).

Магнитный поток Φ , созданный обмоткой возбуждения муфты, проходит через выступающие полюсы магнитопровода 2. При указанном направлении магнитного потока верхние полюсы — северные (N), а нижние — южные (S). Магнитный поток, проходя по гистерезисным дискам 5, создает в них элементарные намагниченные участки $N-S$, которые взаимодействуют с полюсами N и S деталей 2 и 4. Например, если жестко связанные друг с другом детали 2 и 4 перемещаются слева направо, то их магнитные полюсы N удаляются от южных полюсов S элементарных намагниченных участков в гистерезисных дисках 5 и приближаются к северным полюсам N этих участков в дисках 5. Силы взаимодействия этих полюсов с элементарными намагниченными участками приводят к тому, что диски 5 начинают также перемещаться в сторону движения деталей 2 и 4. Это наблюдается, если рассмотреть характер взаимодействия полюсов S с элементарными намагниченными участками в гистерезисных дисках 5.

Технические данные некоторых типов муфт представлены в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Серия муфт	Габарит	Ток управления, А	Предельная частота вращения, мин ⁻¹	Номинальный момент, Н·м	Остаточный момент, Н·м
Многодисковые фрикционные муфты					
ЭТМ	0,5	0,3	5000	16	0,16
ЭТМ	10	0,9	2800	160	36
ЭТМ	15	4,0	1600	1600	198
ЭМ-12	—	0,23	3000	16	—
ЭМ-42	—	0,8	2000	160	—
ЭМ-62	—	2,08	1000	1000	—
Ферропорошковые муфты					
МПБ-63-2	—	4,5	—	6,3	0,6
МПБ-10-2	—	0,22	—	1,0	0,1
МПБ-0,63-2	—	0,16	—	0,06	0,05

§ 2-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

Реле управления коммутируют своими контактами небольшие токи (5—10 А), поэтому их контактные системы просты, а дугогасительные устройства в них обочно не применяются. Основные технические характеристики и особенности конструкций реле управления определяются приводными системами, вызывающими срабатывание аппарата, замыкание или размыкание его контактов.

Реле управления работают в схемах автоматического управления электроприводами. С их помощью можно осуществлять пуск двигателей в функции того или иного параметра, реверсирование и торможение двигателей и т. п. Они используются также для защиты электроустановок от сверхтоков, от понижения напряжения, от обратного тока.

По характеру выполняемой функции наиболее распространены являются реле тока, напряжения, времени и др. *Реле тока и напряжения* контролируют величину тока или напряжения в установке и при достижении их заданного значения (уставки) срабатывают и подают сигнал в схему управления. Промежуточные реле срабатывают от одного (иногда довольно слабого) сигнала и своими многочисленными контактными парами осуществляют коммутацию ряда автономных электрических цепей. Реле времени позволяют осуществлять регулируемую выдержку времени от момента подачи сигнала на вход реле до момента выдачи его оперативным органом выходного сигнала в схему управления.

Реле управления обычно выполняют на электромагнитном принципе действия. Реле тока и напряжения подразделяют на

первичные и вторичные. На рис. 2-3 даны схемы защиты участка сети с двигателями M от тока короткого замыкания ($KЗ$), который вызывает срабатывание реле тока $РТ$, что приводит к подаче напряжения на привод $ЭП$ аппарата $ЭА$ и к его отключению. В варианте (рис. 2-3, а) реле $РТ$ включается через трансформатор тока $ТТ$ (вторичное реле), что резко снижает

ток через обмотку $РТ$ и позволяет сделать его чувствительным и быстродействующим.

В варианте (рис. 2-3, б) весь ток $KЗ$ проходит через обмотку $РТ$ (первичное реле); на этот ток рассчитываются элементы реле, их размеры увеличиваются, чувствительность и быстродействие реле снижаются.

На рис. 2-4, а показан принцип действия реле тока. Обмотка w включается в цепь главного тока i . Когда он достигает значения тока срабатывания, создаваемая магнитным потоком Φ электромагнитная сила $P_{эм}$ становится выше силы P_n противодействующих пружин, якорь

притягивается к полюсам, контакты K замыкаются и подают импульс тока i_y в схему управления. При исчезновении тока i реле возвращается в исходное состояние.

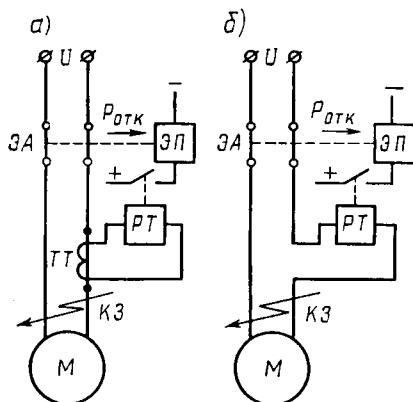


Рис. 2-3. Схемы включения токового реле

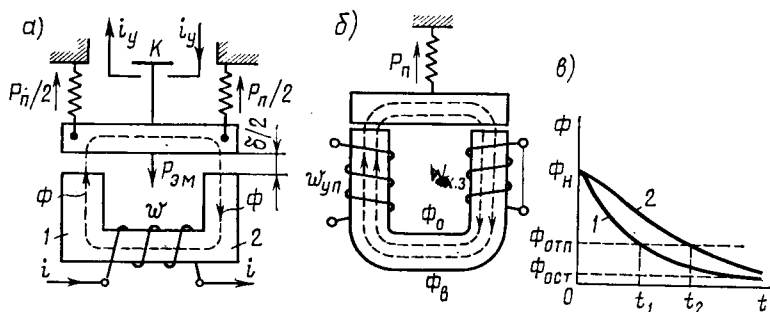


Рис. 2-4. Реле тока и времени

Найдем зависимость тока срабатывания реле от основных факторов. Условие срабатывания: $P_{эм} = P_n$.

По (2-4) для двухполюсного электромагнита сила $P_{эм}$ (Н): $P_{эм} = (\Phi_\delta^2 / 2\mu_0 S) \cdot 2$, где Φ_δ — поток в воздушных зазорах, Вб;

S — площадь полюса, м^2 ; $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$.

Но

$$\Phi_\delta = F_M / R_M = i\omega / R_M.$$

Магнитное сопротивление для потока Φ_δ без учета сопротивления стали и влияния потоков рассеяния (с детали 1 на 2, минующая воздушные зазоры δ) $R_M = \delta_{\text{ср}} / \mu_0 S$.

Из приведенных соотношений находим формулу для тока срабатывания реле:

$$I_{\text{ср}} = (\delta_{\text{ср}} / \omega) \sqrt{P_{\text{п.ср}} / (\mu_0 S)}. \quad (2.6)$$

В реальных реле ток срабатывания регулируется изменением зазора δ , числа витков ω и силы пружины $P_{\text{п}}$.

Если вместо токовой установить в реле обмотку напряжения, тогда оно обращается в реле напряжения. Напряжение срабатывания такого реле $u_{\text{ср}} = Ri_{\text{ср}}$, где R — сопротивление обмотки.

Отпускание реле тока происходит при снижении тока i в обмотке. Аналогично предыдущему можно получить выражение для тока отпускания:

$$I_{\text{отп}} = (\delta_{\text{отп}} / \omega) \sqrt{P_{\text{п.отп}} / (\mu_0 S)}. \quad (2.7)$$

Следует отметить, что для одного и того же реле входящие в формулы величины δ и $P_{\text{п}}$ неодинаковы: $\delta_{\text{ср}} > \delta_{\text{отп}}$ и $P_{\text{п.ср}} < P_{\text{п.отп}}$ (при растянутых пружинах).

Коэффициент возврата реле с учетом (2-7) и (2-8)

$$K_{\text{в}} = I_{\text{отп}} / I_{\text{ср}} = (\delta_{\text{отп}} / \delta_{\text{ср}}) \sqrt{P_{\text{п.отп}} / P_{\text{п.ср}}}. \quad (2.8)$$

Это выражение для $K_{\text{в}}$ является приближенным, так как исходные соотношения для него получены без учета магнитного сопротивления стали и потоков рассеяния. Более точная зависимость для коэффициента возврата $K_{\text{в}}$ имеется в § 4-4.

В табл. 2-2 представлены технические данные отдельных серий отечественных реле управления. Наряду с указанными в таблице широкое применение получили реле управления следующих серий: РПК-1, РП-15, РПУ-0, РПУ-4.

Основанное на электромагнитном принципе реле времени (рис. 2-4, б) содержит короткозамкнутую обмотку $\omega_{\text{к.з}}$ на стальном магнитопроводе. Включение и отключение реле, вызываемое подачей или снятием напряжения обмотки управления $\omega_{\text{уп}}$, вызывает изменение основного магнитного потока Φ_0 . По закону электромагнитной индукции в короткозамкнутой обмотке возникают наведенные токи, которые приводят к появлению потока $\Phi_{\text{в}}$ в переходном режиме. Если реле включается, то в соответствии с принципом Ленца поток $\Phi_{\text{в}}$ направляется навстречу основному, а если реле отключается, $\Phi_{\text{в}}$ направляется согласно

Таблица 2-2

Серия, тип реле	Вид реле	Номинальное на- пряжение $U_{ном}$, ток $I_{ном}$	Напряжение, ток срабатывания	Время срабаты- вания, с	Мощность реле, Вт	Обмоточные данные	
						число витков	диаметр провода, мм
РП-23	Промежуточ- ные	24—220В	$0,7U_{ном}$	0,06	6	3400—30 000	0,23—0,08
РП-221	«	110В	$(0,2 \div 0,6)U_{ном}$	0,011	8	4500	0,17
РП-224	Тока	1—4А	$0,6I_{ном}$	0,01	2	72—18	0,31—0,8
РП-254	«	1—8А	$0,7I_{ном}$	0,05	6	650—83	0,47—1,35
РП-311	Промежуточ- ные	100—220В	$0,7U_{ном}$	0,05	6	3700—8200	0,2 —0,12
ЭВ-100	Времени	24—220В	$0,7U_{ном}$	0,1—20	15—30	2000—18 900	0,44—0,14
ЭВ-215	«	100—380В	$0,7U_{ном}$	0,1—20	20	2000—18 900	0,44—0,14
РТ-40	Тока	0,05—200А	$(0,25 \div 1,0)I_{ном}$	0,1—0,3	—	780—1	—
РН-51	Напряжения	4—100В	1,4—32В	—	—	2000—14 000	0,25—0,09

с Φ_0 . Это реле времени создает большие выдержки при отпускании. Кривые изменения потока во времени даны на рис. 2-4, в, на котором 1 — без обмотки $w_{к.з}$, 2 — при наличии $w_{к.з}$. Если реле отпускает при потоке $\Phi_{отп}$, то время его работы t_2 при наличии $w_{к.з}$ (кривая 2) существенно больше, чем без нее (кривая 1 — время t_1). В реальных реле в качестве $w_{к.з}$ используются короткозамкнутые медные гильзы и шайбы, одеваемые на магнитопровод.

Решение дифференциальных уравнений переходных процессов в электромагнитном реле времени приводит к выражению для магнитного потока в переходном режиме:

$$\Phi(t) = (\Phi_n - \Phi_{ост}) e^{-t/\tau_0} + \Phi_{ост}, \quad (2-9)$$

где $\Phi_{ост}$ — остаточный поток; Φ_n — начальный поток.

Электромагнитная постоянная времени реле (с)

$$\tau_0 = G_m / R_{к.з}, \quad (2-10)$$

где G_m — магнитная проводимость для потока, Гн; $R_{к.з}$ — электрическое сопротивление короткозамкнутой гильзы или шайбы, Ом.

Если положить $\Phi_{ост} \approx 0$, то из (2-9) для потока отпущения

$$\Phi_{отп} = \Phi_n e^{-t_{отп}/\tau_0},$$

где $t_{отп}$ — время отпущения реле.

Используем соотношение $G_m = 1/(R_{ст} + R_\delta)$, где $R_{ст}$ и R_δ — магнитное сопротивление стали и воздушных зазоров. Тогда из этих зависимостей найдем для времени отпущения:

$$t_{отп} = [\mu_0 S / (\delta R_{к.з})] \ln(\Phi_n / \Phi_{отп}), \quad (2-11)$$

где δ — суммарный воздушный зазор; S — сечение полюса магнитной системы.

Распространены реле времени с анкерным (часовым) механизмом. В кинематической схеме такого реле между электромагнитным приводом и контактами ставится анкерный механизм, который создает регулируемую выдержку времени между моментом подачи напряжения на обмотку электромагнита и моментом замыкания контактов: $t = \alpha n z T_a$, где α — угол поворота подвижного контакта от начала движения до замыкания контактов; n — передаточное число зубчатого механизма; z — число зубьев ходового колеса.

Период колебания анкера $T_a = 2\pi \sqrt{J\varphi / (M_{дв} - M_{пр})}$. Здесь J — момент инерции анкера; φ — угол колебания анкера; $M_{дв}$ и $M_{пр}$ — движущий и противодействующий моменты.

Время собственного срабатывания электромагнитной системы реле напряжения складывается из времени трогания якоря $t_{тр}$ и времени движения подвижной системы $t_{дв}$: $t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}$. Составляющая $t_{тр}$ определяет время от момента подачи напряжения на обмотку реле до момента, когда ток в ней достигает величины тока срабатывания. При условии постоянства индуктивности L (Гн) обмотки это время из общеизвестного решения уравнения баланса напряжений в цепи обмотки выражается зависимостью (с)

$$t_{тр} = (L/R) \ln [I_y / (I_y - I_{ср})]. \quad (2-12)$$

Здесь R — активное сопротивление обмотки, Ом; $I_{ср}$ — ток срабатывания, А.

Установившееся значение тока при напряжении U_0 на обмотке $I_y = U_0/R$. Для начальной стадии процесса срабатывания характерен относительно большой воздушный рабочий зазор в электромагните, когда можно пренебречь влиянием сопротивления стали в сравнении с сопротивлением рабочего воздушного зазора R_δ . Если допустить, что все магнитные силовые линии сцеплены со всеми витками обмотки, то индуктивность L обмотки из w витков $L = w^2/R_\delta$.

Чтобы найти зависимость для времени движения $t_{дв}$, допустим, что в переходном режиме активное сопротивление обмотки равно нулю. Тогда уравнение баланса напряжений на обмотке примет вид $U_0 = w d\Phi/dt$, где U_0 — напряжение на обмотке; w — число витков; Φ — магнитный поток.

Решение этого уравнения при начальном условии $t = 0$ — $\Phi_{тр}$ имеет вид

$$\Phi = \Phi_{тр} + U_0 t / w. \quad (2-13)$$

Поток трогания $\Phi_{тр}$ определяется из равенства электромагнитной и противодействующей сил ($P_{эм} = P_{тр}$). Из формулы Максвелла имеем $\Phi_{тр} = \sqrt{2\mu_0 S P_{тр}}$, где $P_{тр}$ — сила противодействующей пружины при срабатывании.

Зависимость (2-13) определяет закономерность нарастания рабочего магнитного потока во время движения якоря. Используя формулу Максвелла, можно получить выражение для изменяющейся во времени тяговой силы электромагнитной системы:

$$P_{эм}(t) = (1/2\mu_0 S)(\Phi_{тр} + U_0 t / w)^2. \quad (2-14)$$

Уравнение поступательного движения подвижной системы имеет вид $m d^2 x / dt^2 = P_{эм}(t) - P_{п}$, где m — масса подвижной системы; x — пройденный путь; t — время; $P_{эм}$ — электромагнитная сила, изменяющаяся во времени; $P_{п}$ — сила противодействующей пружины.

С учетом (2-14) получим уравнение движения, справедливое для любого момента времени, в том числе и для $t = 0$, когда $x = 0$. Из этого начального условия находим, что при постоянной противодействующей силе пружины два члена в полученном уравнении сокращаются и оно приобретает вид:

$$d^2 x / dt^2 = \{ [K U_0^2 / (m w^2)] t^2 \} + [2K U_0 \Phi_{тр} / (m w)] t,$$

где $K = 1/(2\mu_0 S)$.

Окончательное решение при начальных условиях $t = 0$; $dx/dt = 0$ и $x = 0$ имеет вид

$$x = [KU_0\Phi_{\text{тр}}/(3m\omega)]t^3 + [KU_0^2/(12m\omega^2)]t^4. \quad (2-15)$$

Это выражение представляет собой зависимость хода подвижной системы реле от времени. Если графически изобразить зависимость $P_{\text{эм}}(t)$ по (2-14) и зависимость $x(t)$ по (2-15), с ее помощью определить изменение величины рабочего воздушного зазора во времени $\delta(t) = \delta_0 - x(t)$, (δ_0 — начальный воздушный зазор), то можно графически построить динамическую тяговую характеристику электромагнитной системы реле, т.е. зависимость $P_{\text{эм}}(\delta)$ для процесса движения якоря. По графикам $P_{\text{эм}}(\delta)$ и $\delta(t)$ для разных моментов времени (t_1, t_2 и др.) определяются величины $P'_{\text{эм}}, P''_{\text{эм}} \dots$, а также $\delta_1, \delta_2 \dots$ и по ним строится динамическая характеристика $P_{\text{эм}} = f(\delta)$.

§ 2-3. МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ КОНТАКТЫ (ГЕРКОНЫ)

На электромагнитном принципе действия работают герметизированные или магнитоуправляемые контакты — *герконы* (рис. 2-5, а), контактные элементы которых (плоские ферромагнитные пружины K) расположены в запаянном стеклянном баллоне, заполненном инертным газом. Это предотвращает окисление и загрязнение контактов. Подача напряжения u на обмотку w вызывает появление магнитного потока, замыкающегося через пластины. В месте перехода потока с одной пластины на другую возникает электромагнитная сила, которая смыкает контакты, изгибая контактные пружины. При снятии напряжения контакты размыкаются под действием упругих сил пружин.

На рис. 2-5, а, б даны геометрические параметры геркона: контактное перекрытие a , длины l_0, l_k и l_r , воздушные зазоры — начальный δ_n и конечный δ_k , ширина пластины b .

Характеристики сил P в герконе показаны на рис. 2-5, в. Тяговые (электромагнитные) характеристики $P = f(\delta)$ даны для двух значений МДС — срабатывания $F_{\text{ср}} = (Iw)_{\text{ср}}$ и номинальной рабочей МДС $F_p = (I_{\text{ном}}w)$. Характеристика при МДС срабатывания $F_{\text{ср}}$ касается характеристики противодействующих сил $P_{\text{пр}} = f(\delta)$ в одной точке А, соответствующей так называемому зазору срабатывания $\delta_{\text{ср}}$. Отключенному состоянию геркона соответствует начальный зазор δ_n , включенному — зазор δ_k , определяемый толщиной немагнитных контактных накладок.

Характер магнитных потоков в герконе показан на рис. 2-6, а. Рабочий поток Φ_s проходит через пластины и рабочий воздушный зазор. Основной поток рассеяния Φ_σ через них не проходит и замыкается вокруг обмотки, потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ частично проходят по пластинам, но не проходят через рабочий воздушный зазор. На схеме замещения (рис. 2-6, б) нанесены МДС обмотки F_m , магнитные сопротивления $R_{\sigma 1}$ для потоков рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и R_σ — для потока Φ_σ , а также сопротивления для ра-

бочего потока Φ_δ — внутреннее сопротивление $R_{вн}$ (при ненасыщенных пластинах — сопротивление рабочего зазора R_δ) и сопротивление наружное $R_{нар}$ (по воздуху вокруг обмотки).

Рассмотрим расчетные соотношения для геркона без учета потоков рассеяния Φ_σ и $\Phi_{\sigma 1}$ и магнитного сопротивления стали [20]. По энергетической формуле

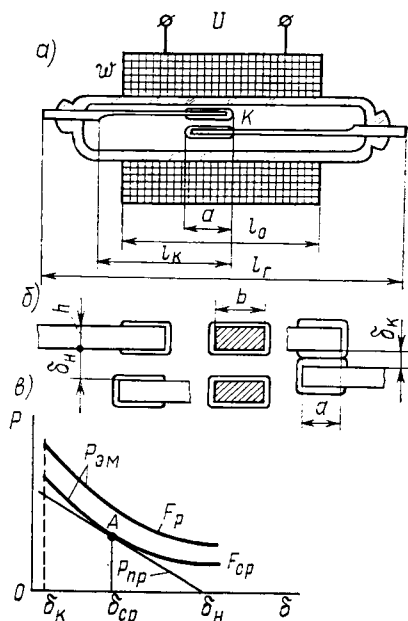


Рис. 2-5. Геркон и его характеристики

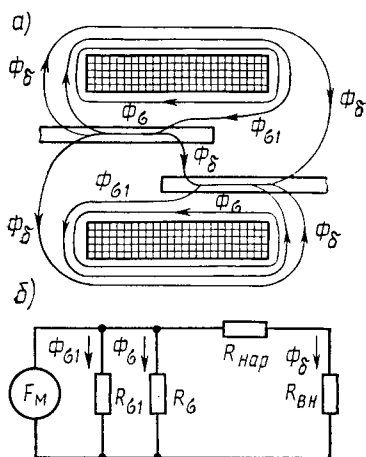


Рис. 2-6. Магнитные потоки в герконе и схема замещения магнитной цепи

$$P_{ЭМ} = [- (Iw)^2 / 2] d\lambda_{пн} d\delta. \quad (2-16)$$

В соответствии со схемой замещения (рис. 2-5, б) полная магнитная проводимость при указанных допущениях

$$\lambda_{пн} = \frac{1}{R_{нар} + R_{вн}} = \frac{1}{(1/\lambda_{нар}) + (1/\lambda_{вн})} = \frac{\lambda_{вн}\lambda_{нар}}{\lambda_{вн} + \lambda_{нар}}. \quad (2-17)$$

Противодействующая сила упругости контактных пластин при небольших перемещениях концов (при начальном зазоре δ_H)

$$P_{пр} = C_{п}(\delta_H - \delta). \quad (2-18)$$

Приведенная жесткость двух пластин $C_{п} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, которая при одинаковых пластинах ($C_1 = C_2 = C$) равна $C_{п} = C/2 = Ebh^3 / (8l_K)$, где E — модуль упругости; b , h и l_K — ширина, толщина и длина пластин.

Для точки A касания характеристик (рис. 2-5, в) справедливо:

$$P_{эм} = P_{пр} \text{ и } dP_{эм}/d\delta = dP_{пр}/d\delta.$$

С учетом (2-16) и (2-18) для $F_{ср} = (I\omega)_{ср}$ имеем:

$$\begin{aligned} [- (I_{ср}\omega)^2/2] (d\lambda_{п}/d)_{ср} &= C_{п} (\delta_{н} - \delta_{ср}); \\ [- (I_{ср}\omega)^2/2] (d^2\lambda_{п}/d\delta^2)_{ср} &= -C_{п}. \end{aligned}$$

Отсюда получаем выражение для тока срабатывания геркона:

$$I_{ср} = 1/\omega \sqrt{-2C_{п} (\delta_{н} - \delta_{ср}) (d\lambda_{п}/d\delta)_{ср}}. \quad (2-19)$$

Исключив из двух предыдущих выражений $I_{ср}\omega$, можно найти аналитическое выражение для зазора срабатывания $\delta_{ср}$:

$$\delta_{ср} = \delta_{н} + [(d\lambda_{п}/d\delta)_{ср}] / [(d^2\lambda_{п}/d\delta^2)_{ср}]. \quad (2-20)$$

С учетом (2-17) при условии $\lambda_{нар} = \text{const}$ получаем

$$\delta_{ср} = \delta_{н} + \frac{(\lambda_{нар} + \lambda_{вн}) (d\lambda_{вн}/d\delta)}{(\lambda_{нар} + \lambda_{вн}) (d^2\lambda_{вн}/d\delta^2) - 2 (d\lambda_{вн}/d\delta)^2}. \quad (2-21)$$

Наружная проводимость

$$\lambda_{нар} = (1/2) \lambda_0 l_r. \quad (2-22)$$

где l_r — длина геркона.

Удельная наружная проводимость λ_0 находится по кривым (рис. 2-7) с использованием соотношений для эквивалентного диаметра сечения пластины $d_{экв} = (2/\pi)(b+h)$ и для среднего диаметра обмотки $d_0 = (d_{нар} + d_{вн})/2$.

Если использовать простейшую зависимость для внутренней магнитной проводимости (зазор) и ее производных:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{вн} &= \mu_0 ab/\delta; \\ d\lambda_{вн}/d\delta &= -\lambda_{вн}/\delta; \\ d^2\lambda_{вн}/d\delta^2 &= 2\lambda_{вн}/\delta^2, \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

то из (2-21) для $\delta = \delta_{ср}$ можно получить $\delta_{ср} = 2\delta_{н}\lambda_{нар}/(3\lambda_{нар} + \lambda_{вн})$.
С учетом (2-22) и (2-23)

$$\delta_{ср} = 0,67 [\delta_{н} - (\mu_0/\lambda_0) (ab/l_r)], \quad (2-24)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м; a — перекрытие пластин; l_r — длина геркона.

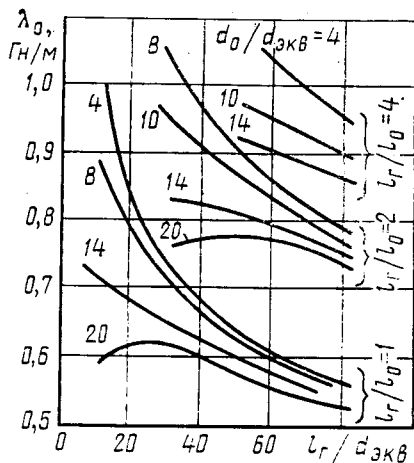


Рис. 2-7. Зависимость удельной внешней магнитной проводимости геркона от его размеров

Из равенства $P_{эм} = P_{п}$ при $\delta = \delta_k$ получаем выражение для тока отпускания геркона:

$$I_{отп} = 1/w \sqrt{-2C_{п}(\delta_n - \delta_k)/(d\lambda_{п}/d\delta)_k}. \quad (2-25)$$

Нажатие в контактах геркона

$$P_k = P_{эм} - P_{п} = [-(Iw)^2/2] (d\lambda_{п}/d\delta)_k - C_{п}(\delta_n - \delta_k). \quad (2-26)$$

Характерные разновидности обычных герконов изображены на рис. 2-8, *а-г*, на котором *а* и *г* — замыкающие герконы, *б* — переключающий геркон, *в* — переключающий с помощью металлического шарика *М* (срабатывает при изменении наклона геркона или перемещении шарика с помощью магнитного поля).

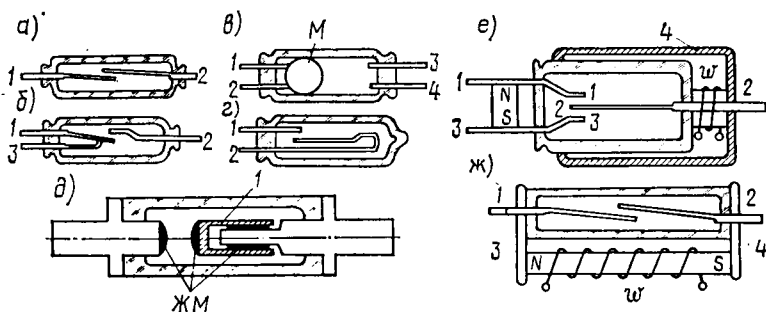


Рис. 2-8. Разновидности герконов

В герконе плунжерного типа (рис. 2-8, *д*) на поверхности контактов молекулярные силы удерживают жидкий металл ЖМ (Hg), что не требует создания силы нажатия в контактах и улучшает качество контакта. Плунжер 1 из ферромагнитного материала выполнен в виде трубки, контактирующей с контактодержателем через слой жидкого металла. При подаче тока в управляющую обмотку электромагнитная сила перемещает плунжер влево и контакты замыкаются. При снятии тока возвратный элемент перемещает плунжер в исходное состояние.

Поляризованный геркон (рис. 2-8, *е*) при срабатывании замыкает или размыкает контакты 1—2 или контакты 2—3 в зависимости от направления тока в обмотке управления w . Магнитный поток от нее, проходящий по магнитопроводу 4 и пластине 2, в зазорах 1—2 и 2—3 разделяется на верхний и нижний части. Магнитный поток от постоянного магнита складывается с потоком от w , в другом — они вычитаются друг из друга. Если потоки складываются в верхнем зазоре, замыкаются контакты 1—2, если же это происходит в нижнем зазоре — замыкаются контакты 2—3. Таким образом, изменение направления тока в обмотке w (и потока от нее) приводит к переключению геркона.

На рис. 2-8, ж иллюстрируется принцип действия геркона с памятью. Импульс тока, поданный на обмотку ω , создает магнитный поток, в результате чего замыкаются контакты геркона. После снятия импульса тока контакты остаются в замкнутом состоянии за счет потока от намагниченного сердечника $N-S$. Чтобы контакты разомкнулись, в обмотку подается импульс противоположной полярности, создающий поток противоположного направления.

Вместо постоянного магнита $N-S$ можно применить контактные пластины из материала с большей остаточной намагниченностью (реманентные материалы). При снятии импульса тока с управляющей обмотки контакты остаются замкнутыми за счет остаточного магнитного потока.

Приведем основные данные по некоторым промышленным типам герконов:

	КЭМ-1	КЭМ-3	МК-27-3	КЭН-4
Коммутируемый ток, А	0,5	1,0	0,3	2
Коммутируемое напряжение, В	220	127	100	100
Время срабатывания, мс	3,0	1,5	1,5	10,0
МДС срабатывания, А	55—110	30—100	30—80	230

Кроме указанных применяются такие типы герконов: КЭМ-2, КЭМ-6, МК-10-3, МК-16-3, МУК-1А-1, МК-52-3В, МК-27-11. Выпускаются также реле напряжения на герконах РЭС-42, РЭС-43, РЭС-44, РЭС-55 и др. Первые три типа работают на напряжении 12 и 27 В, четвертый — на 3,6 и 27 В.

На основе герконов созданы разные виды аппаратов, в том числе реле и путевые выключатели. На рис. 2-8 даны два варианта построения путевых выключателей на герконах. В варианте (рис. 2-9, а) на перемещающейся со скоростью v детали 5 механизма устанавливается постоянный магнит $N-S$. При подходе к геркону 3 поток Φ от постоянного магнита замыкается через ферромагнитные пластины 1 и 4, в результате чего замыкаются контакты 2 геркона за счет электромагнитной силы в воздушном зазоре между ними. Когда постоянный магнит $N-S$ отходит от геркона, магнитный поток исчезает и контакты 2 расходятся под действием упругих сил плоских пружин 1 и 4.

В варианте (рис. 2-9, б) вблизи геркона устанавливается постоянный магнит $N-S$. Созданный им поток замыкается через ферромагнитные пластины геркона и включает его. Когда в пространстве между герконом и постоянным магнитом перемещается

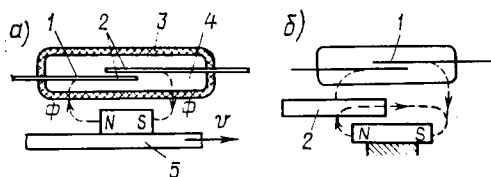


Рис. 2-9. Путевые выключатели на герконах

ферромагнитная деталь 2, связанная с контролируемым механизмом, происходит перераспределение потока: основная часть замыкается через деталь 2. Замыкающая через геркон часть потока становится недостаточной для удержания контактов 1 во включенном состоянии и они размыкаются под действием упругих сил плоских пружинящих пластин. Следовательно, при подходе механизма (и детали 2) к определенному положению происходит коммутация оперативного тока герконом. При отходе детали 2 от этого положения геркон возвращается в исходное состояние.

§ 2-4. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ

Длительные токи перегрузки (до 5—10 $I_{ном}$) перегревают электрооборудование, и когда его температура превышает допустимую, оно автоматически отключается тепловой защитой. Эту защиту обеспечивают *тепловые реле или позисторные устройства*.

Принцип устройства теплового реле серии ТРП показан на рис. 2-10,а. Тепловые реле содержат биметаллический элемент, который при нагреве изгибается и переводит контактную систему в отключенное или включенное состояние. Биметаллический эле-

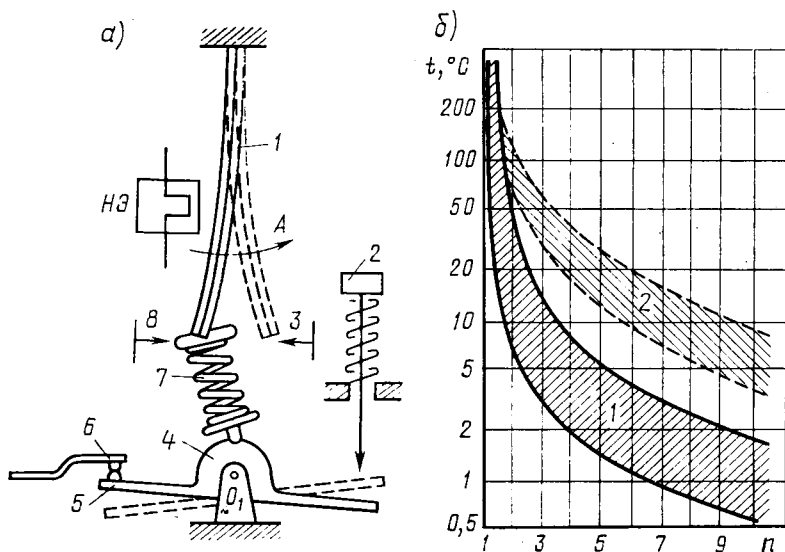


Рис. 2-10. Тепловые реле и их характеристики

мент представляет собой двухслойную пластинку из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. При нагреве слой термоактивного металла расширяется, а слой термоинертного металла почти не деформируется. Если один конец биметаллической пластинки жестко закрепить, то другой свободный конец ее будет изгибаться.

Биметаллическая пластинка 1 упирается в верхний конец пружины 7. Нижний конец пружины давит на выступ пластмассовой

колодки 4, которая может поворачиваться вокруг оси O_1 . В положении, изображенном на рисунке, движение пластинки 1 и верхнего конца пружины 7 влево ограничены упором 8. Силы пружины 7 действуют на выступ пластмассовой колодки 4 так, что она оказывается повернутой по часовой стрелке, а укрепленный на ней мостиковый подвижной контакт 4 замкнутым с неподвижным контактом 6.

При протекании повышенного тока биметаллическая пластинка 1 нагревается и ее нижний конец перемещается в направлении стрелки А. В результате верхний конец пружины 7 переходит вправо и создаваемая ею сила действует на колодку 4 так, что она поворачивается на некоторый угол против часовой стрелки, а контакты 5 и 6 размыкаются. Упоры 3 и 8 ограничивают положение нижнего конца пластинки 1. Возврат пластины в исходное положение может произойти самопроизвольно, когда биметаллическая пластинка остынет. В других вариантах реле не имеет самовозврата и перевод его в исходное положение осуществляется кнопкой ручного возврата 2. В рассмотренном реле осуществляется мгновенный переброс контактов из одного положения в другое и нажатие на контакты не зависит от усилия, развиваемого биметаллической пластиной.

Зависимости времени срабатывания тепловых реле от кратности n тока перегрузки I_n по отношению к номинальному $I_{ном}$ показаны на рис. 2-10, б. Область 1 относится к условиям, когда аппарат срабатывает в холодном состоянии, т. е. когда его токоведущие элементы не нагреты и имеют температуру окружающей среды. Область 2 соответствует срабатыванию с нагретого состояния, когда токоведущие части аппарата нагреты длительно протекавшим током.

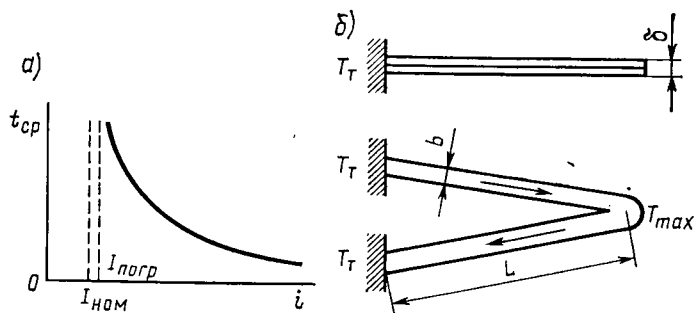


Рис. 2-11. Термобиметаллический элемент

Толщина δ_1 и δ_2 (рис. 2-11, б) компонентов биметаллического элемента из условия максимальной чувствительности биметалла подбирается в соответствии с соотношением

$$\delta_1/\delta_2 = \sqrt{E_2/E_1},$$

где E_1 и E_2 — модули упругости компонентов.

Обычно биметаллы подбираются так, чтобы механическая прочность компонентов была одинакова. Тогда $E_1 = E_2 = E$ и $\delta_1 = \delta_2$, $\delta_1 + \delta_2 = \delta$.

Стрела прогиба h (см) консольно закрепленной биметаллической пластинки:

$$h = (3,4)(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_{\text{окр}}) l^2 / \delta. \quad (2-27)$$

Здесь $\alpha_1 - \alpha_2$ — разность коэффициентов линейного расширения, $1/\text{град}$; T — температура нагрева биметалла, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; l — длина биметаллической пластинки, см; δ — общая толщина пластинки ($\delta = \delta_1 + \delta_2$), см.

Сила, развиваемая на свободном конце биметаллической пластинки при протыводействии ее изгибу (H),

$$P = (3,16) E (\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_{\text{окр}}) b \delta^2 / l, \quad (2-28)$$

где b — ширина пластинки, см; l и δ — размеры, см; E — модуль упругости, $\text{H}/\text{см}^2$.

Максимальное механическое напряжение, наблюдаемое в пограничном слое,

$$\sigma_{\text{max}} = (E/2) (\alpha_1 - \alpha_2) (T - T_{\text{окр}}). \quad (2-29)$$

Чтобы не было остаточных деформаций, надо выполнить условие $\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{доп}}$, где $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение, $\text{H}/\text{см}^2$.

Допустимая температура нагрева биметалла

$$T_{\text{доп}} \leq T_{\text{окр}} + 2\sigma_{\text{доп}} / [E (\alpha_1 - \alpha_2)]. \quad (2-30)$$

Рассмотрим биметаллический элемент, обтекаемый током I (А), имеющий U -образную форму и закрепленный обоими концами на неподвижных токоведущих частях (рис. 2-11, б).

В установившемся режиме для любого сечения справедливо уравнение баланса мощности:

$$-\lambda(b\delta) (d^2T/dx^2) + K_{\tau} 2(b + \delta) T = I^2 R_0. \quad (2-31)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности биметалла, $\text{Вт}/(\text{см} \times \text{град})$; K_{τ} — коэффициент теплопередачи с наружной поверхности в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град})$; R_0 — сопротивление единицы длины элемента, $\text{Ом}/\text{см}$.

Первый член в (2-31) определяет теплопередачу за счет теплопроводности по металлу, второй член — теплоотвод в окружающую среду.

Решение (2-31) имеет вид

$$T = \frac{I^2 \rho}{2K_{\tau}(b + \delta)b\delta} + C_1 \exp \left[- \frac{x}{\sqrt{\frac{\lambda b \delta}{2K_{\tau}(b + \delta)}}} \right] + \\ + C_2 \exp \left[+ \frac{x}{\sqrt{\frac{\lambda b \delta}{2K_{\tau}(b + \delta)}}} \right],$$

где ρ — удельное эквивалентное сопротивление биметалла, $\text{Ом} \cdot \text{см}$.

Для определения постоянных интегрирования C_1 и C_2 возьмем следующие граничные условия: $T = T_T$ при $x = \pm l$, где T_T — температура токоведущей части.

При условиях $\delta \ll b$ и $b + \delta \approx b$ окончательное выражение для максимальной температуры нагрева биметаллического элемента (при $x = 0$) приобретает вид

$$T_{\max} = \frac{I^2 \rho}{2K_T b^2 \delta} - \frac{(I^2 \rho / 2K_T b^2 \delta) - T_T}{\operatorname{ch} [l \sqrt{2K_T / (\lambda \delta)}]}. \quad (2-32)$$

Температура нагрева токоведущих частей T_T определяется по (1-20). Зависимость времени срабатывания биметаллического элемента от тока (амперсекундная характеристика) имеет вид, представленный на рис. 2-11, б. Минимальный ток срабатывания $I_{\text{погр}}$, называемый пограничным током, можно определить, используя найденные выражения. Пусть средняя температура нагрева биметаллического элемента определяется как среднее арифметическое:

$$T_{\text{ср}} = (T_{\max} + T_T) / 2 = (T_T / 2) (1 + 1 / \operatorname{ch} \beta) + (T_1 / 2) (1 - 1 / \operatorname{ch} \beta). \quad (2-33)$$

Здесь $T_1 = I^2 \rho / (2K_T b^2 \delta)$ и $\beta = \sqrt{2K_T / \lambda \delta} l$.

Допустим, что срабатывание произойдет, если конец биметаллической пластинки прогнется на величину h_0 . Этому условию соответствует температура срабатывания $T_{\text{ср}}$. По выражению (2-27) имеем следующую взаимозависимость между этими величинами:

$$T_{\text{ср}} = T_{\text{окр}} + 4\delta h_0 / [3l^2 (\alpha_1 - \alpha_2)]. \quad (2-34)$$

Обычно температура $T_{\text{окр}}$ мала в сравнении с величиной, определяемой вторым слагаемым в этом выражении, и ею можно пренебречь. С другой стороны, есть зависимость (2-33) для средней температуры нагрева биметаллического элемента, которая определяется протекающим по элементу током I . Если средняя температура элемента равна температуре срабатывания, то соответствующий ей ток, очевидно, является пограничным. Приравняв (2-33) и (2-34), находим пограничный ток (A):

$$I_{\text{погр}} = \frac{4}{l} \sqrt{\frac{K_T \delta h_0}{3(\alpha_1 - \alpha_2) \left[\frac{\rho}{b^2 \delta} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \beta}\right) + \frac{2\rho}{S\rho} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{ch}^2 \beta}\right) \right]}}. \quad (2-35)$$

Зависимость времени срабатывания от тока можно найти на основе решения уравнения баланса энергии:

$$I^2 R dt = K_T S_{\text{охл}} \theta dt + c \gamma V d\theta. \quad (2-36)$$

В этом уравнении R — сопротивление рассматриваемого участка; $S_{\text{охл}}$ — его боковая поверхность; V — объем; $\theta = T - T_{\text{окр}}$ — температура перегрева биметалла, °C.

Решение (2-36) [при условиях $t = 0 - \theta = \theta_0$; $S_{\text{окл}} \approx 2bl$; $V = b\delta l$ имеет вид

$$\theta = \frac{I^2 \rho}{2K_T b^2 \delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{2K_T}{c\gamma \delta} t\right) \right] + \theta_0 \exp\left(-\frac{2K_T}{c\gamma \delta} t\right). \quad (2-37)$$

Если в начале процесса температура элемента равна температуре окружающей среды ($\theta_0 = 0$), то

$$T = T_{\text{окр}} + [I^2 \rho / (2K_T b^2 \delta)] \{ 1 - \exp[-2K_T t / (c\gamma \delta)] \}. \quad (2-38)$$

Допустим, что срабатывание происходит, когда температура достигает величины $T_{\text{ср}}$, которой соответствует необходимый прогиб h_0 . С учетом (2-31)

$$\frac{4\delta h_0}{3(\alpha_1 - \alpha_2) l^2} = \frac{I^2 \rho}{2K_T b^2 \delta} \left[1 - \exp\left(-\frac{2K_T}{c\gamma \delta} t_{\text{ср}}\right) \right],$$

где $t_{\text{ср}}$ — время срабатывания, с.

Окончательно время срабатывания $t_{\text{ср}}$ (с), полученное из приведенной зависимости,

$$t_{\text{ср}} = \frac{c\gamma \delta}{2K_T} \ln \frac{1}{1 - 8K_T h_0 b^2 \delta^2 / [3I^2 \rho l^2 (\alpha_1 - \alpha_2)]}. \quad (2-39)$$

В режиме протекания тока короткого замыкания можно принять, что нагрев биметалла происходит адиабатно, без отдачи теплоты в окружающую среду. Тогда в исходном уравнении (2-36) можно положить $K_T = 0$ и получить $I^2 R dt = c\gamma V d\theta$.

Если это уравнение проинтегрировать в пределах времени от 0 до $t_{\text{ср}}$ и в пределах температур перегрева от 0 до $\theta_{\text{ср}}$, то

$$\theta_{\text{ср}} = I^2 \rho t_{\text{ср}} / (c\gamma b^2 \delta^2) = T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}}.$$

Используя выражение (2-34), находим окончательное выражение для определения времени срабатывания (с) в адиабатном режиме:

$$t_{\text{ср}} = 4c\gamma b^2 \delta^2 h_0 / [3\rho l^2 I^2 (\alpha_1 - \alpha_2)]. \quad (2-40)$$

В расчетные формулы (2-35), (2-39) и (2-40) входят: K_T — коэффициент теплопередачи с поверхности, Вт/(см²·град); ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·см; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(см·град); α — температурные коэффициенты линейного расширения, 1/град; γ — плотность, г/см³; c — теплоемкость материала, Дж/(г·град); δ — толщина биметалла, см; b — его ширина, см; l — длина элемента, см; h_0 — стрела прогиба, см; p — периметр поперечного сечения биметаллического элемента, см; S — поперечное сечение биметалла, см²; I — ток, А.

В качестве термоинертного материала применяют сплавы Fe с Ni (сплавы Н-36 и Н-42), в качестве термоактивного — специальные стали, латунь, бронзу и др. В табл. 2-3 указаны свойства биметаллов.

Таблица 2-3

Компоненты	Модуль упругости $E \cdot 10^4$, Н/мм ²	Разность коэффициентов линейного расширения ($\alpha_1 - \alpha_2$) $\cdot 10^{-6}$, 1/град	Удельное электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^{-4}$, Ом·см	Пределы рабочих температур, °С	Удельная теплоемкость C , Дж/(г·град)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·град)
Хромоникелевая сталь СН-36	15—20	18	0,79	(—60)—(+200)	—	—
Молибденоникелевая сталь СН-36	15—19,5	16—18	0,79—0,96	(—60)—(+200)	—	—
Молибденоникелевая сталь СН-42	16—19,5	12—14	0,68—0,73	(—60)—(+375)	—	—
Хромоникелевая сталь СН-42	16—20	13,5	0,6	(—60)—(+375)	—	—
Немагнитная сталь СЭН-36	19,5	20,0	0,79	(—50)—(+200)	0,5	0,125
Латунь СН-36	12,7	19	0,17	(—50)—(+200)	0,45	0,625
Никель СН-36	18,5	12	0,18	(—50)—(+200)	0,49	0,42
Бериллиевая бронза СН-36	13,6	18	0,16	(—50)—(+200)	0,46	0,42

Тепловую защиту электрооборудования можно осуществлять на основе позисторов. *Позисторы* — это терморезисторы из сегнетоэлектрических растворов на основе титаната бария, электрическое сопротивление которых на определенном небольшом диапазоне температур резко возрастает (рис. 2-12). Это позволяет ис-

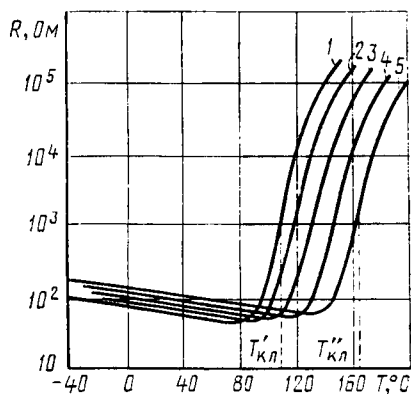


Рис. 2-12. Зависимости сопротивления позисторов от температуры для различных марок:

1 — СТ14-15; 2 — СТ14-2-115; 3 — СТ14-1А; СТ14-2-130; 4 — СТ14-2-145; 5 — СТ14-2-160

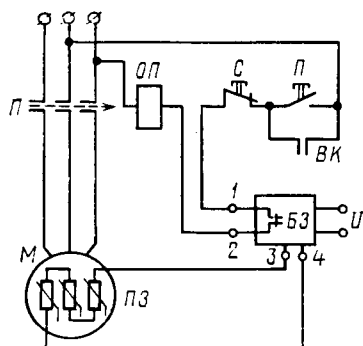


Рис. 2-13. Схема позисторной защиты двигателей

пользовать их в качестве преобразователей при защите электрооборудования от недопустимого превышения температуры. Средняя температура $T_{\text{кл}}$ ($^{\circ}\text{C}$) в области скачка сопротивления ($T_1 - T_2$) для различных позисторов составляет: 130°C для СТ14-1А, 115 для СТ14-2-115, 145 для СТ14-2-130, 160 для СТ14-2-160. Сопротивление позисторов R в области скачка при изменении температуры $T_{\text{кл}}$ равно: 550 Ом при -5°C , 1330 при $+5$, 4000 при $+15^{\circ}\text{C}$.

Позисторы $ПЗ$ встраиваются в защищаемый двигатель M (рис. 2-13). Тип позистора выбирается таким, чтобы температура $T_{\text{кл}}$ скачка его сопротивления равнялась допустимой температуре нагрева двигателя. При достижении этой температуры резко увеличившееся сопротивление позисторов создает на входе блока защиты $БЗ$ (клеммы $3-4$) такой режим, что $БЗ$ срабатывает, размыкает свои контакты на выходе (клеммы $1-2$) и разрывает цепь обмотки $ОП$ пускателя $П$, при этом пускатель отключает двигатель. Основным элементом $БЗ$ может служить, например, полупроводниковый триггер, который «перевертывается» при резком увеличении сопротивления в цепи базы входного транзистора, выходным органом — промежуточное реле с нормально закрытыми контактами.

Глава 3

КОНТАКТОРЫ И ПУСКАТЕЛИ

§ 3-1. УСТРОЙСТВО КОНТАКТОРОВ И ПУСКАТЕЛЕЙ

Контакты коммутируют номинальные токи нагрузки и токи перегрузки (до 7—10-кратных значений по отношению к номинальному). *Пускатели* осуществляют пуск, остановку и защиту двигателей от перегрузки; они коммутируют те же токи, что и контакторы. Относительное количество изготавливаемых пускателей должно примерно соответствовать количеству двигателей, которое составляет %: на токи до 6,3 А — 50,8, на токи от 6,3 до 25 А — 39,2, на токи от 25 до 63 А — 8,0, на токи более 63 А — 2. Пределы номинального тока контакторов — от 4 до 2500 А.

Номинальные напряжения контакторов постоянного и переменного тока указаны в табл. 3-1 (ГОСТ 11206—77).

Таблица 3-1

Узел аппарата	Вид тока, В	
	постоянный	переменный
Главная цепь	220, 440, 750	380, 660, 1140
Втягивающая обмотка	24, 48, 110, 220	36, 127, 220, 380, 660
Вспомогательные контакты	От 24 до 440	От 36 до 660

Механическая износостойкость определяет способность контактного аппарата выполнять определенное число операций включение — отключение без тока в цепи главных контактов при наибольшей допустимой частоте циклов. Существует пять классов механической износостойкости.

Разным классам механической износостойкости (ГОСТ — 12434—74) свойственна наибольшая частота циклов Z (1/ч) и износостойкость $N_{\text{мх}}$ (млн. циклов):

Классы	Z	$N_{\text{мх}}$
1	30	0,3
2	150	1,6
3	600	6,3
4	1200	10
5	3600	16

Коммутационная износостойкость — это способность аппарата выполнять определенное число операций коммутации тока контактами при заданных условиях в цепи (напряжение, постоянная времени, коэффициент мощности, собственная частота, коэффициент амплитуды восстанавливающегося напряжения и др.). Характерные величины этого вида износостойкости в циклах — 10^3 , 10^4 , 10^5 и 10^6 .

Условия эксплуатации аппаратов не всегда требуют высоких значений их износостойкости и допустимой частоты операций. Для народного хозяйства требуется примерно 60% от общего количества аппаратов низкого напряжения с малыми значениями износостойкости ($\sim 10^3$) и частоты срабатываний (10 1/г). Металлургические, подъемно-транспортные и другие приводы характеризуются большой частотой операций включение — отключение или переключение (до 1200 в час), реверсированием и торможением противовключением. Учитывая необходимость регулирования скорости вращения таких приводов, для них применяют бесконтактные станции управления на полупроводниковых элементах и реж — контакторы с высокой износостойкостью.

Категории применения контакторов переменного тока A_1 , A_2 , A_3 и A_4 и постоянного тока D_1 , D_2 и D_3 регламентированы (табл. 3-2).

Они обусловлены различными режимами коммутации электрических цепей. Так, категории A_1 соответствует режим отключения цепи со слабоиндуктивной нагрузкой, когда угол сдвига фаз между током и напряжением цепи близок к нулю. В этих условиях мгновенное значение возвращающегося напряжения промышленной частоты (напряжение источника в момент перехода тока через нулевое значение) невелико и скорость восстановления напряжения за переходом тока мала:

$$dU_B/dt = \frac{d}{dt}(V\sqrt{2}U_{\text{ном}} \sin \omega t) = V\sqrt{2}\omega U_{\text{ном}} \cos \omega t.$$

Максимальная скорость ($t=0$)

$$(dU_B/dt)_{\text{max}} = V\sqrt{2}\omega U_{\text{ном}}.$$

При $\omega = 314$ рад/с, напряжении $U_{\text{ном}} = 380$ В $(dU_B/dt)_{\text{max}} = 0,168$ В/мкс. При таких малых скоростях восстановления напряжения процесс отключения цепи оказывается очень легким. Условия отключения электродвигателей переменного тока определяются степенью скольжения ротора двигателя относительно вращающегося магнитного поля статора. Во вращающемся асинхронном двигателе это поле создает основной магнитный поток Φ_0 . При отключении статорной обмотки поток Φ_0 должен исчезнуть. Но отключение статора вызывает появление в роторе тока, который в соответствии с законом инерции Ленца стремится поддержать поток Φ_0 . Поток, создаваемый током ротора, неподвижен относительно последнего, но он вращается вместе с ротором

Категория применения контакторов	Основное применение контакторов	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
		включение			отключение			включение			отключение		
		отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	коэффициент мощности	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	коэффициент мощности	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	коэффициент мощности	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	коэффициент мощности

Переменный ток

A_1	Электродвигатели, со- противления. Не- индуктивная или слабониндуктивная нагрузка	1	1	0,95	1,0	1,0	0,95	—	—	—	—	—	—
A_2	Пуск электродви- гателей с фазным ротором. Торможе- ние противовклю- чением	2,5	1	0,65	2,5	1,0	0,65	4,0	1,1	0,65	4,0	1,1	0,65
A_3	Пуск электродвига- телей с коротко- замкнутым рото- ром. Отключение вращающихся электродвигателей	6	1	0,35	1,0	0,17	0,35	10	1,1	0,35	8,0	1,1	0,35
A_4	Пуск электродвига- телей с коротко- замкнутым рото- ром. Отключение неподвижных или медленно вращаю- щихся электродви- гателей. Реверси- рование электро- двигателей	6	1	0,35	6,0	1,0	0,35	10	1,1	0,35	8,0	1,1	0,35

Категория применения контакторов	Основное применение контакторов	Режим нормальных коммутаций						Режим редких коммутаций					
		включение			отключение			включение			отключение		
		отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	постоянная времени цепи, м·с	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	постоянная времени цепи, м·с	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	постоянная времени цепи, м·с	отношение коммутируемого тока к номинальному рабочему	отношение напряжения к номинальному рабочему	постоянная времени цепи, м·с

Постоянный ток

D_1	Электродвигатели. Сопротивления. Неиндуктивная или слабоиндуктивная нагрузка	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	—	—	—	—	—	—
D_2	Пуск электродвигателей. Отключение вращающихся электродвигателей	2,5	1,0	10	1,0	0,3	10	10	1,1	10	10	1,1	10
D_3	Пуск электродвигателей. Отключение неподвижных или медленно вращающихся электродвигателей	2,5	1,0	10	2,5	1,0	10	10	1,1	10	10	1,1	10

Примечания: Режимы, характеризующие применение контакторов для коммутации конденсаторов и ламп с вольфрамовой нитью, не номинируются. Переменный ток выражен действующим значением симметричной составляющей. Допуск на коэффициент мощности цепи $\pm 0,05$; допуск на постоянную времени цепи $\pm 1,5\%$.

и наводит в неподвижном статоре ЭДС E_0 , противоположную по направлению напряжению сети U_c . Поэтому на контактах отключающего аппарата действует напряжение $U_k = U_c - E_0$.

Таким образом, при числе оборотов ротора $n = 0$ ЭДС $E_0 = 0$ и $U_k = U_c$, а при $n > 0$ ЭДС $E_0 > 0$ и $U_k = U_c - E_0$.

ЭДС E_0 затухает во времени, так как вращающийся по инерции ротор теряет запас кинетической энергии и ток в роторе уменьшается вследствие прекращения поступления энергии из сети. Но восстановление напряжения на контактах аппарата, определяющее условия гашения дуги, происходит непосредственно за моментом перехода тока в цепи статора через нулевое значение. Так как в это время при небольшом скольжении значе-

ние E_0 относительно велико, то скорость восстановления напряжения прямо пропорциональная разности $U_c - E_0$, становится небольшой, а условия гашения дуги — простыми. Из этого следует, что чем больше скольжение в отключаемом двигателе, тем меньше E_0 в статоре и тем сложнее условия гашения дуги переменного тока при отключении цепи. Наиболее сложные условия наблюдаются, когда отключается заторможенный двигатель (режим A_4). В этом случае E_0 равна нулю, а восстанавливающееся напряжение на контактах контактора становится максимальным.

Режимам A_3 и A_4 соответствует большой угол сдвига фаз между током и направлением, когда $\cos \varphi = 0,35$. Это ведет к возрастанию скорости и абсолютной величины восстанавливающегося напряжения на коммутирующем органе, что делает более сложными условия отключения тока. Так, для $U_c = 380$ В в трехфазной схеме отключения ($K_{cx} = 1,5$) возвращающееся напряжение по (1-10)

$$U_0 = \sqrt{(2/3)} K_{cx} U_{ном} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \\ = \sqrt{(2/3)} 1,5 \cdot 380 \sqrt{1 - 0,35^2} = 440 \text{ В,}$$

а скорость восстановления напряжения по (1-12)

$$(dU_{в}/dt)_{ср} = 2K_a f_0 U_0 = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^4 \cdot 440 = 13,2 \cdot 10^6 \text{ В/с} = 13,2 \text{ В/мкс.}$$

Здесь приняты характерные для условий работы аппаратов значения коэффициента амплитуды $K_a = 1,5$ и собственной частоты цепи $f_0 = 10$ кГц. Для сопоставимых условий скорость восстановления напряжения на коммутирующем органе аппарата в режиме A_4 почти в 100 раз выше, чем в режиме A_1 .

Различие в величинах электромагнитной постоянной времени цепи постоянного тока для режима D_1 и D_3 (табл. 3-2) обуславливает разные значения электромагнитной энергии, которую должен рассеять аппарат при отключении тока. В соответствии с (1-2) постоянная времени (с)

$$\tau_э = L/R = LI_0/U_{ном}, \quad (3-1)$$

где L — индуктивность цепи, Гн; R — активное сопротивление, Ом; I_0 — отключаемый ток, А; $U_{ном}$ — напряжение источника, В.

Тогда для рассеиваемой аппаратом электромагнитной энергии видоизменяются выражение (1-16)

$$W_{эм} = LI_0^2/2 = \tau_э U_{ном} I_0/2 \quad (3-2)$$

и формула (1-17) для коммутационных перенапряжений

$$U_{max} = U_{ном} + L di/dt = U_{ном} [1 + (\tau_э/I_0) (di/dt)]. \quad (3-3)$$

Для примера, в режиме D_3 при $\tau_э = 10 \cdot 10^{-3}$ с, напряжении $U_{ном} = 440$ В, токе $I_0 = 100$ А и $(di/dt) = 40 \cdot 10^3$ А/с получаем

$$W_{эм} = 10 \cdot 10^3 \cdot 440 \cdot 100/2 = 220 \text{ Дж;}$$

$$U_{max} = 440 [1 + (10 \cdot 10^{-3}/100) 40 \cdot 10^3] = 2200 \text{ В.}$$

Увеличение постоянной времени τ , и интенсивности коммутации тока (di/dt возрастает) приводит к росту перенапряжений. Чтобы не вызвать пробой изоляции, эти перенапряжения не должны превышать допустимый уровень (примерно пятикратный относительно $U_{ном}$). Поэтому не всегда целесообразно стремиться к увеличению интенсивности действия коммутирующего органа аппарата.

На рис. 3-1 приведена схема, поясняющая принцип действия контактора.

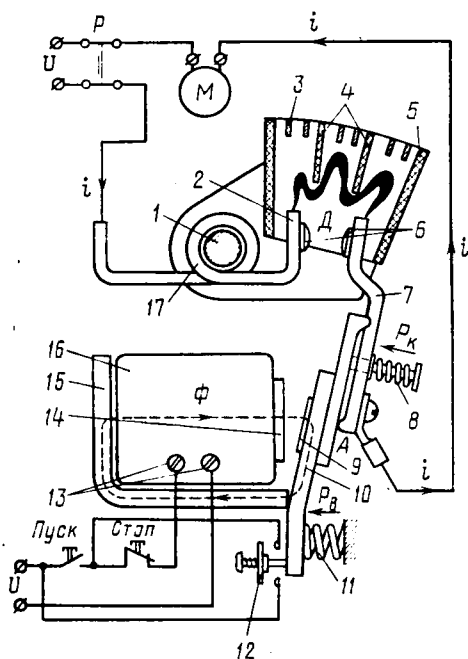


Рис. 3-1. Устройство и схема включения контактора

Главные контакты контактора включены в силовую цепь двигателя M , втягивающая обмотка контактора — в цепь управления, содержащую кнопки *Пуск* и *Стоп*. Контактор изображен в состоянии, когда он отключает силовую цепь двигателя. В этом случае напряжение с обмотки 16, установленной на сердечнике 15, снято и его подвижная система под действием возвратной пружины 11, создающей силу P_v , приходит в нормальное состояние. Возникающая при расхождении главных контактов 6 дуга D гасится в дугогасительной камере 5, имеющей изоляционные перегородки 4, которые способствуют растяжению дуги, увеличению ее длины и сопротивления. На выходе дугогасительной камеры установлены металлические пластины 3 пламя-

гасительной решетки, обеспечивающие рассеивание остаточного столба ионизированных газов, возникших в процессе гашения дуги.

Быстрый выход дуги с контактов в камеру обеспечивается системой так называемого магнитного дутья. В цепь главного тока включена последовательная обмотка 17, которая размещена на стальном сердечнике 1. Две стальные пластины — полюса, расположенные по бокам сердечника 1, подводят создаваемое обмоткой 17 магнитное поле к зоне горения дуги в камере. Взаимодействие этого поля с током дуги приводит к появлению сил, которые способствуют вхождению дуги в камеру. Дугогасительная камера 5 изготавливается из дугостойкого изоляционного материала (асбоцемент).

Контактор включается, если подается напряжение на зажимы 13 обмотки 16 приводного электромагнита, что осуществляется нажатием пусковой кнопки. Поток Φ , созданный током, протекающим через обмотку электромагнита, развивает тяговую силу и якорь 10 электромагнита притягивается к его сердечнику, преодолев силы противодействия возвратной 11 и контактной 8 пружин. При включении контактора пусковая кнопка шунтируется вспомогательными контактами 12 контактора. Поэтому при ее отпуске цепь обмотки 16 не разрывается и контактор остается во включенном состоянии.

Сердечник электромагнита оканчивается полюсным наконечником 14, поперечное сечение которого больше поперечного сечения сердечника. Этим достигается некоторое увеличение силы, создаваемой электромагнитом, а также видоизменение тяговой характеристики электромагнита (зависимости электромагнитной силы от величины воздушного зазора). На якоре 10 установлена немагнитная прокладка 9 (латунь) толщиной 0,1—0,2 мм для уменьшения силы, обусловленной остаточной индукцией, и предохранения таким образом якоря магнитной системы от залипания при снятии с обмотки напряжения.

Соприкосновение контактов 2 и 7 друг с другом и замыкание цепи при включении контактора происходит раньше, чем якорь электромагнита полностью притянется к полюсу. По мере движения якоря подвижный контакт 7 как бы проваливается, упираясь верхней частью в неподвижный контакт 2, который поворачивается на некоторый угол вокруг точки А и вызывает дополнительное сжатие контактной пружины 8. Возникает так называемый *провал контактов*, под которым подразумевается величина смещения подвижного контакта на уровне точки его касания с неподвижным контактом в случае, если неподвижный контакт удален.

Провал контактов обеспечивает надежное замыкание цепи, если толщина контактов уменьшается вследствие выгорания их материала под воздействием электрической дуги. Величина провала определяет запас материала контактов на износ в процессе работы контактора и обычно составляет 1—10 мм.

В момент соприкосновения подвижный контакт 7 оказывает давление на неподвижный контакт 2, обусловленное предварительным натяжением контактной пружины 8. Переходное сопротивление контактов в момент их касания небольшое и контактная площадка не разогревается при включении до значительной температуры. Кроме того, предварительное контактное нажатие, созданное пружинной 8, позволяет снизить вибрацию (отскоки) подвижного контакта при ударе его о неподвижный контакт. Все это предохраняет контакты от приваривания при включении электрической цепи. На контактах имеются контактные накладки 6, выполненные из специального материала, например серебра, чтобы улучшить условия длительного прохождения тока через замкнутые контакты во включенном состоянии. Часто применяются

накладки из дугостойкого контактного материала для уменьшения износа контактов под воздействием электрической дуги.

Пускатель может осуществлять пуск, останов, реверс и защиту двигателей. Его основное принципиальное отличие от контактора состоит в наличии защитного элемента, например теплового реле, осуществляющего автоматическую защиту от перегрузок двигателей. На рис. 3-2 дана схема реверсивного пускателя. Реверс осуществляется переключением двух фаз с помощью главных контактов

аппарата с 1—2—3 (назад) на 2—1—3 (вперед) или наоборот. Пускатель управляется командоаппаратом КА, содержащим кнопку В (вперед) и кнопку Н (назад), каждая из которых имеет размыкаемые (верхние) и замыкаемые (нижние) контакты, а также кнопку С (Стоп) с размыкаемыми контактами. Для включения контактов В (вперед) надо нажать кнопку В на командоаппарате КА. Тогда замкнувшийся нижний контакт обеспечит цепь тока через обмотку 8 (от точки а через контакты 11 и 12 теплового реле — обмотку 8 пускателя — замкнувшийся нижний контакт кнопки В — замкнутый верхний контакт кнопки Н — замкнутый контакт кнопки С — к точке б). После отпускания кнопки В цепь тока не разрывается, так как нижние контакты В зашунтированы замкнувшимися при срабатывании вспомогательными контактами 10.

Для изменения направления вращения двигателя, подключаемого к клеммам 4, 5 и 6, надо нажать кнопку Н. Ее верхние контакты размыкают цепь тока через обмотку 8 (и контакты 10), контактор В отключается, а включение контактов Н происходит аналогично предыдущему при замыкании цепи на обмотку 7 (через кнопку С и верхние контакты кнопки В). Отключение аппарата осуществляется нажатием кнопки С (Стоп), прерывающей цепь тока в обмотках 7 и 8. Автоматическое отключение при токах перегрузки осуществляют тепловые реле ТР размыканием контактов 11 и 12.

подавляющее большинство современных контакторов и пускателей — это аппараты контактного типа, работающие в среде атмосферного воздуха. Однако прогресс низковольтного электроаппаратостроения обусловил появление новых видов аппаратов на основе оригинальных научных и технических решений. К ним от-

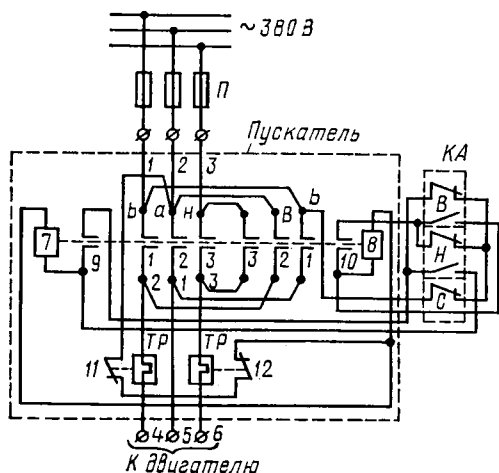


Рис. 3-2. Схема реверсивного пускателя

носятся герметизированные и вакуумные контакторы, контакторы с жидкометаллическими контактами, синхронные и гибридные контакторы, тиристорные пускатели.

§ 3-2. СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ДУТЯ

Системы магнитного дутья создают магнитное поле, с которым взаимодействует ток дуги. Возникающая сила ускоряет перемещение столба дуги с контактов в дугогасительную камеру и способствует ее гашению. Широко распространены системы последовательного и параллельного магнитного дутья.

Обмотка K последовательного магнитного дутья (рис. 3-3, а) включается в цепь главного тока i . При параллельном дутье (рис. 3-3, б) обмотка K включается на полное напряжение. В том и другом случаях поток Φ , создаваемый обмоткой магнитного дутья K , подводится к зоне горения дуги. Взаимодействие тока дуги i_d с потоком магнитного дутья Φ приводит к появлению силы P , загоняющей дугу в дугогасительную камеру. На рис. 3-3, в изображена конструктивная схема системы магнитного дутья. Обмотка K расположена на стальном сердечнике 1, к торцам которого примыкают стальные полюсы 2. В результате возникает сила взаимодействия P между магнитным потоком Φ и током дуги. Эта сила должна перемещать столб дуги в сторону дугогасительной камеры 3, чтобы обеспечить условия интенсивного охлаждения дуги изоляционными стенками камеры. Для определения направления силы P можно воспользоваться правилом левой руки или простыми физическими соображениями. Вокруг дуги — проводника с током — создается магнитный поток. По одну сторону от дуги (рис. 3-3, в) силовые линии внешнего магнитного поля, создаваемого обмоткой магнитного дутья, имеют одинаковые направления с линиями магнитного поля тока дуги, по другую — разные. В первом случае результирующее поле усиливается, во втором — ослабляется. Следовательно, по одну сторону от столба дуги имеется большая плотность силовых линий, по другую — меньшая. Дуга перемещается в ту сторону, где магнитное поле ослаблено. Это объясняется тем, что присущие магнитным силовым линиям механические силы бокового распора (отталкивания силовых линий друг от друга) больше там, где выше плотность силовых линий. Результирующая сила, воздействующая

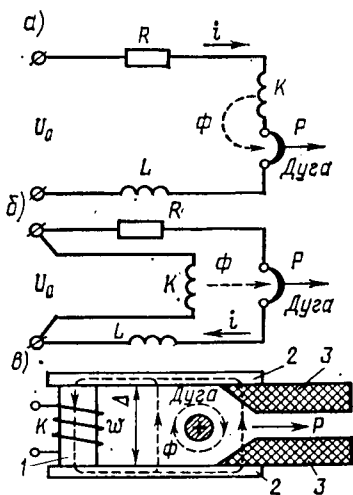


Рис. 3-3. Системы магнитного дутья

щая на дугу, направлена в сторону меньшей плотности силовых линий магнитного поля. На рис. 3-3, в результирующая плотность силовых линий больше слева от столба дуги, чем справа. Поэтому сила P направлена вправо.

Проводник длиной l с током i , расположенный в магнитном поле с индукцией B , испытывает механическую силу $P = Bil \sin \psi$, где ψ — угол между вектором индукции и вектором тока. В системах магнитного дутья этот угол $\psi = 90^\circ$ и $\sin \psi = 1$.

Если от индукции B перейти к напряженности магнитного поля $H (B = \mu_0 H, \text{ где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м})$ и выражать напряженность магнитного поля в амперах на метр, ток i в амперах и длину проводника l в метрах, то вышеприведенная формула приобретает вид (H)

$$P = \mu_0 H i l / 4\pi. \quad (3-4)$$

Если пренебречь сопротивлением стали магнитопровода системы магнитного дутья, то в простейшем случае напряженность магнитного поля $H = i\omega/\Delta$, где ω — число витков обмотки магнитного дутья; Δ — расстояние между полюсами в зоне расположения дуги, м.

Тогда при последовательном дутье

$$P = (\mu_0 / 4\pi) (\omega l / \Delta) i^2. \quad (3-5)$$

При параллельном дутье, когда $i = U/R_k$, где R_k — сопротивление обмотки, имеем

$$P = (\mu_0 / 4\pi) (\omega l U / \Delta R_k) i. \quad (3-6)$$

В формулах (3-5) и (3-6) P — сила, Н; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; l — длина дуги, м; U — напряжение, В; R_k — сопротивление катушки, Ом; i — ток, А; Δ — воздушный зазор между стальными пластинами, м; ω — число витков обмотки.

Таким образом, при параллельном дутье сила воздействия на дугу пропорциональна току i в первой степени, а при последовательном — квадрату тока. На рис. 3-4 изображены зависимости силы, действующей на дугу при последовательном P_1 и параллельном P_2 магнитном дутье, от величины тока. Если взаимное расположение кривых P_1 и P_2 , обусловленное соответствующим выбором параметров той или другой системы магнитного дутья, подобно расположению, изображенному на рис. 3-4, то в зоне малых токов I время дуги t_r'' меньше при параллельном дутье t_r'' , чем при последовательном t_r' . В зоне II больших токов наблюдается обратное ($t_r'' > t_r'$).

Так как при последовательном дутье сила пропорциональна квадрату тока, целесообразно использовать этот вид дутья в контакторах, рассчитанных на сравнительно большие номинальные токи. Число витков обмотки последовательного дутья, сечение про-

вода которой выбирается по номинальному току аппарата, обычно небольшое $\omega = 1 \div 10$.

Изображенные на рис. 3-4 зависимости времени дуги от тока $t_r = f(I)$ имеют характерный для аппаратов управления вид. При малых токах действующие на дугу силы магнитного дутья незначительны, дуга гасится за счет механического растяжения расходящимися контактами. Чем больше ток, тем большее расстояние между контактами требуется для гашения дуги и время его достижения увеличивается, при этом время дуги увеличивается.

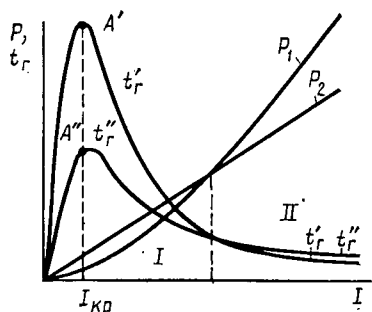


Рис. 3-4. Зависимости силы и времени дуги от тока при магнитном дутье

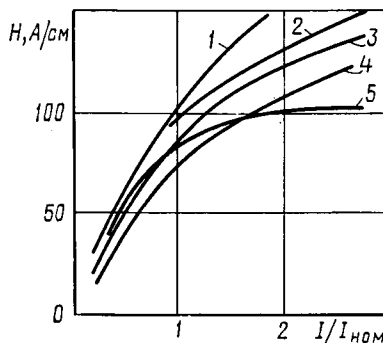


Рис. 3-5. Кривые напряженности поля магнитного дутья в контакторах постоянного тока различных типов:

1 — для контактора типа КПД-113 $I_{НОМ} = 150$ А, $\omega = 6$; 2 — для КП-31 $I_{НОМ} = 20$ А, $\omega = 33$; 3 — для КН-431 $I_{НОМ} = 200$ А, $\omega = 2$; 4 — для КРВ-602 $I_{НОМ} = 100$ А, $\omega = 7$; 5 — для КРВ-605 $I_{НОМ} = 603$ А, $\omega = 2$

Начиная с некоторого критического тока $I_{кр}$ электродинамические силы становятся достаточными для выдувания дуги из межконтактного зазора. С ростом тока (при $i > I_{кр}$) время дуги сокращается, так как при этом пропорциональные квадрату тока силы усиливают дугогашение.

Параметры системы последовательного магнитного дутья целесообразно выбирать так, чтобы в области малых токов не было насыщения магнитопровода. Тогда почти вся магнитодвижущая сила $i\omega$ обмотки возникает в воздушном зазоре и напряженность поля в зоне горения становится максимальной. При больших токах магнитопровод, наоборот, насыщается, а его магнитное сопротивление — увеличивается. Это снижает напряженность магнитного поля в зоне расположения дуги, уменьшает силу P и интенсивность гашения дуги, снижает перенапряжение при гашении дуги.

На рис. 3-5 дана зависимость напряженности поля последовательного магнитного дутья H от кратности тока по отноше-

нию к номинальному для ряда контакторов постоянного тока. В системе последовательного магнитного дутья направление силы не зависит от направления тока ($P \equiv i^2$). Это позволяет применять ее не только на постоянном, но и на переменном токе. Однако на переменном токе вследствие появления вихревых токов в магнитопроводе может возникнуть сдвиг по фазе между током дуги и результирующим магнитным потоком, что может вызвать обратное «забрасывание» дуги в камеру. Это явление особенно проявляется при повышенной частоте тока.

Векторная диаграмма системы последовательного магнитного дутья на переменном токе представлена на рис. 3-6, а. В магнитной системе (см. рис. 3-3, в) проходит результирующий магнитный поток Φ_Σ , созданный протекающим по обмотке основным током i и наведенными в деталях 2 и 3 магнитопровода вихревыми токами, которые определяют индуктивную составляющую реактивного магнитного сопротивления X_M , зависящую от потерь в стали.

Поток Φ_Σ наводит ЭДС вихревых токов E_B . Созданный ею вихревой ток в магнитопроводе вызывает появление потока Φ_B . Поток Φ_B в геометрической сумме с потоком Φ_0 от тока в обмотке определяет поток Φ_Σ . Соответствующее построение позволяет определить направление потока Φ_0 , который совпадает с основным током i в обмотке магнитного дутья. Результирующая магнитоподвижная сила $i\omega$ равна геометрической сумме падений магнитного потенциала на активном ΦR_M и реактивном ΦX_M магнитных сопротивлениях.

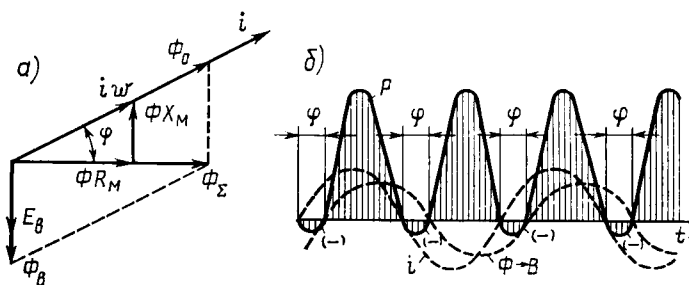


Рис. 3-6. Векторная диаграмма и характер процессов в системе магнитного дутья на переменном токе

Суммарный поток Φ_Σ отстает по фазе от тока i на угол φ , называемый углом магнитного запаздывания. С учетом потерь от гистерезиса P_r и вихревых токов P_B

$$\sin \varphi = P_{ст} / U_K i_K = (P_{вх} + P_r) / (U_K i_K), \quad (3-7)$$

где U_K и i_K — действующие значения напряжения и тока в серийной обмотке; $P_{ст}$ — потери в стали.

Таким образом, мгновенные значения тока дуги и потока в системе магнитного дутья

$$i = I_m \sin \omega t \text{ и } \Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \varphi).$$

Соответственно индукция B поля магнитного дутья

$$B = \Phi / S = B_m \sin (\omega t - \varphi).$$

Сила взаимодействия тока и поля магнитного дутья по (3-4) на единице длины дуги ($l = 1$)

$$P = Bi / 4\pi = (1/4\pi) B_m I_m [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]. \quad (3-8)$$

На рис. 3-6, б построены кривые изменения во времени величин i , Φ и P . Как видим, сила в определенные интервалы времени принимает отрицательные значения. При этом она выбрасывает дугу из дугогасительной камеры. Угол магнитного запаздывания φ , величина и время существования отрицательной силы тем выше, чем больше частота отключаемого тока. Обратное забрасывание дуги вследствие малой инерционности ее столба из-за наличия отрицательной силы может в известных условиях привести к отказам контактора и авариям. Во избежание этого надо максимально уменьшить потери в стали магнитопровода, как это следует из (3-7).

Потери от гистерезиса P_r и вихревых токов P_v равны (Вт)

$$P_c = P_r + P_v = 20 [\sigma_r f / 100; + \sigma_v (f / 100)^2] B^2 V^2 \gamma \cdot 10^{-4}. \quad (3-9)$$

Здесь f — частота сети, Гц; B — действующее значение индукции в стали, Тл; V — объем стали сердечника, вычисляемый с учетом неполного заполнения сердечника из-за наличия изоляции между пластинами, см³; γ — плотность стали, г/см³.

Коэффициенты потерь от гистерезиса σ_r и вихревых токов σ_v , отнесенные к частоте 50 Гц, для распространенных электротехнических сталей составляют $\sigma_r = 1,3 \div 1,6$ и $\sigma_v = 0,4 \div 2,8$.

§ 3-3. ДУГОГАСИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ

Типичные контактные системы аппаратов управления изображены на рис. 3-7. Если в них нет дугогасительных камер, то они называются устройствами с открытым разрывом дуги. На рычажных контактах (рис. 3-7, а) образуется один разрыв дуги, на мостиковых (рис. 3-7, б) — два разрыва 1 и 2. Возможности для гашения дуги у мостиковых лучше, чем у рычажных, но в мостиковых имеется два места контактирования, поэтому требуется создать в них удвоенную силу контактного нажатия ($2P_k$) в сравнении с рычажными (P_k), что приводит к увеличению мощности электромагнитного привода аппарата.

Для выхода образующейся электрической дуги с контактов со скоростью v_d требуется создавать необходимые условия: силу взаимодействия тока дуги с полем магнитного дутья или с полем от контура тока и минимальное расстояние между контактами. Создание этих условий требует определенного времени, которое назовем временем неподвижности дуги $t_{нп}$. На рис. 3-8 даны зависимости $t_{нп}$ от произведения

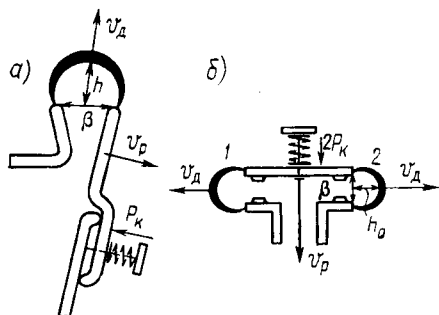


Рис. 3-7. Дугогасительные устройства с открытым разрывом

напряженности магнитного поля H в зоне дуги при трех значениях тока I_0 .

На рис. 3-9 даны номограммы, позволяющие определить индукцию B поля магнитного дутья, необходимую для выдувания дуги из межконтактного промежутка длиной a при разных токах.

Образующиеся на контактах дуги имеют сложные и нерегулярные формы, которые при расчетах обычно приводятся к упрощенным формам, изображенным на рис. 3-7. Дуги растягиваются аэродинамическими силами и силами электромагнитного взаимодействия тока дуги с полем магнитного дутья от контура тока. Протекающий по контактным элементам ток создает в зоне горения дуги магнитное поле, с которым взаимодействует участок тока в столбе дуги, в результате чего появляются собственные электродинамические силы.

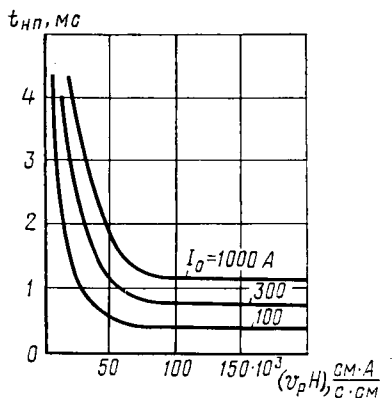


Рис. 3-8. Зависимость времени неподвижности дуги от произведения скорости расхождения контактов на напряженность поля

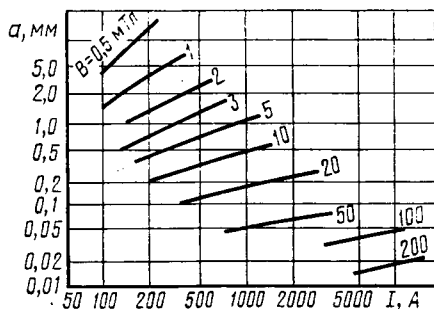


Рис. 3-9. Номограммы для определения критической индукции поля магнитного дутья

Дугообразная форма газоразрядного столба также создает растягивающие усилия. Она приводит к тому, что для успешного гашения дуги при сравнительно больших токах целесообразнее иметь малый раствор контактов β . На рис. 3-10 изображены схемы токоведущих участков цепи при малом (а) и большом (б) расстояниях между контактами. Проходящий по ним ток создает магнитный поток, силовые линии которого замыкаются вокруг проводника с током. На рисунке показаны контуры магнитных

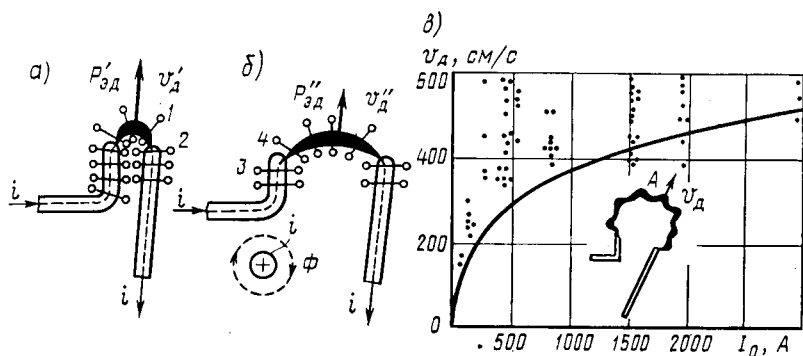


Рис. 3-10. Рычажные контакты и скорость дуги на них

силовых линий 1, 2, 3, 4 вблизи расположения дуги. Из рисунка видно, что во внутренней зоне плотность силовых линий магнитного поля тем больше, чем меньше расстояние между контактами. Следовательно, и сила взаимодействия тока дуги (на единицу длины) с этим магнитным полем возрастет при уменьшении расстояния между контактами. На рис. 3-10, в дана опытная зависимость средней скорости движения v_d верхней точки А свободной дуги от величины тока. Нижнюю границу измеренных значений можно представить следующей эмпирической зависимостью (при $I < 3000$ А)(см/с):

$$v_d \approx 37 \sqrt[3]{I_0}. \quad (3-10)$$

Большой разброс значения v_d при различных токах вызван влиянием различных факторов (потоки плазмы, неопределенная форма столба с петлеобразными участками и др.).

При небольших значениях тока (до 200 А), когда в ней еще не образуются петлеобразные участки, затормаживающие ее движение, *скорость дуги* можно оценить на основе равенства электродинамической движущей силы и противодействующей силы аэродинамического торможения. Для этих условий справедлива зависимость (см/с):

$$v_d \approx 2,12 I_0 \sqrt{\beta}, \quad (3-11)$$

где β — раствор контактов, см, I_0 — ток А.

Скорость свободной дуги (см/с) с током I (А) в магнитном поле напряженностью H

$$v_d \approx 41,2 \sqrt[3]{IH^2/(1 + 0,4H^{0,3})^2}. \quad (3-12)$$

Эквивалентный диаметр (см) столба дуги, движущийся со скоростью v_d (см/с), при токе I (А)

$$d = 1,12 \sqrt{I/(20 + v_d)}. \quad (3-13)$$

Щелевые камеры (рис. 3-11) выполнены из дугостойкого изоляционного материала — асбестоцемента или изоляционной керамики, теплофизические коэффициенты которых таковы: для асбестоцемента $\lambda = 0,9$ Вт/(м·град), $K_T = 2 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град), $c = 900$ Дж/(кг·град), $\gamma = 1,8$ г/см³; для керамики $\lambda = 1,3$ Вт/(м·град), $K_T = 3 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град), $c = 1000$ Дж/(кг·град), $\gamma = 2,3$ г/см³.

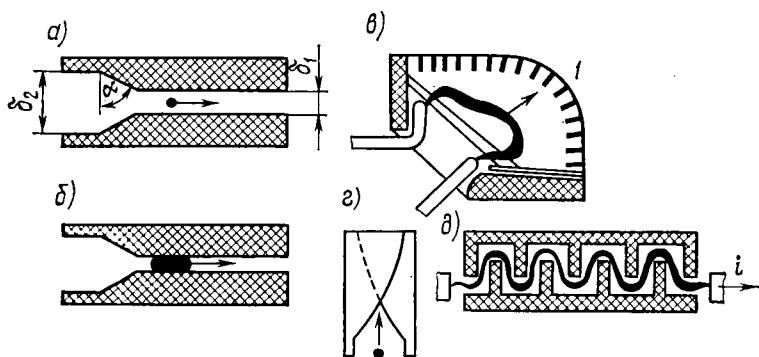


Рис. 3-11. Некоторые виды дугогасительных щелевых камер

Щелевые камеры обычно применяются в сочетании с магнитным дутьем. При соприкосновении со стенками камеры дуговой столб охлаждается интенсивнее, что способствует гашению дуги. Различают дугогасительные камеры с широкой и узкой щелями (рис. 3-11, а, б). Когда диаметр дуги меньше ширины щели, форма поперечного сечения дуги не деформируется, и такую камеру принято называть камерой с широкой щелью (рис. 3-11, а). Если же диаметр поперечного сечения дуги больше ширины щели, то при входе в камеру форма поперечного сечения дуги изменяется (рис. 3-11, б). Наблюдается более тесное соприкосновение дуги со стенками камеры и интенсивное ее охлаждение. Такую камеру называют камерой с узкой щелью. На том же рисунке изображены камера с искрогасительной решеткой 1 (рис. 3-11, в) и *лабиринтная камера* (рис. 3-11, г, д).

На рис. 3-12 даны опытные зависимости скорости движения дуги в щелевых камерах от напряженности поля магнитного дутья H при токах 250, 1000 и 2500 А и ширине щели $\delta = 1, 2$

и 4 мм. Для надежного движения дуги в камере надо создать напряженности магнитного поля выше некоторых критических значений, указанных в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Ток, А	δ_2 , мм	Минимальная напряженность поля, А/см								
		$\delta_1=1$ мм			$\delta_1=2$ мм			$\delta_1=4$ мм		
		$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=75^\circ$
2	2	17,5	15	7,5	—	—	—	—	—	—
	4	—	130	—	10	7,5	2,5	—	—	—
	8	—	190	—	—	—	—	2,5	—	2,5
	16	210	205	170	25	15	12,5	2,5	—	2,5
35	2	27,5	22,5	12,5	—	—	—	—	—	—
	4	—	150	—	12,5	12,5	1,5	—	—	—
	8	—	195	—	—	—	—	5	—	1,5
	16	230	215	155	40	17,5	12,5	5	—	1,5
150	2	205	167	160	—	—	—	—	—	—
	4	—	172	—	12,5	7,5	2,5	—	—	—
	8	—	205	—	—	—	—	7,5	—	1,5
	16	238	220	175	45	35,5	22,5	7,5	—	1,5
300	2	218	190	180	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	—	18	—	5	—	—	—
	8	—	—	—	—	—	—	7,5	—	1,5
	16	245	220	175	50	—	23	7,5	—	1,5
600	2	165	130	67,5	—	—	—	—	—	—
	4	—	140	—	58	15	7,5	—	—	—
	8	—	185	—	—	—	—	7,5	—	1,5
	16	235	210	170	210	142	115	7,5	—	1,5

Примечание. Обозначения указаны на рис. 3-11, а.

Скорость движения дуги постоянного тока в щелочной камере (см/с)

$$v_d = (6 + \delta) \sqrt{12,5 I H_{\text{вн}} \delta}, \quad (3-14)$$

где δ — ширина щели, мм; $H_{\text{вн}}$ — напряженность внешнего магнитного поля, А/см; I — ток дуги, А.

Дугогасительная камера в аппаратах низкого напряжения увеличивает активное сопротивление дуги, которое ограничивает ток дуги, уменьшает возвращающееся напряжение и снижает

скорость восстановления напряжения при переменном токе. Имеется тип дугогасительной камеры, в которой можно достичь значительного увеличения длины дуги без существенного изменения ее габаритов. Это — многократная дугогасительная камера, устройство которой показано на рис. 3-13.

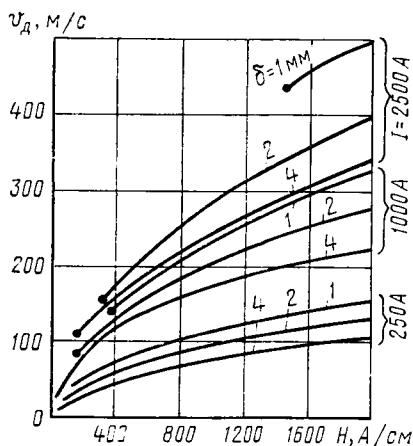


Рис. 3-12. Зависимость скорости дуги от напряженности поля при различных токах I и ширине щели δ

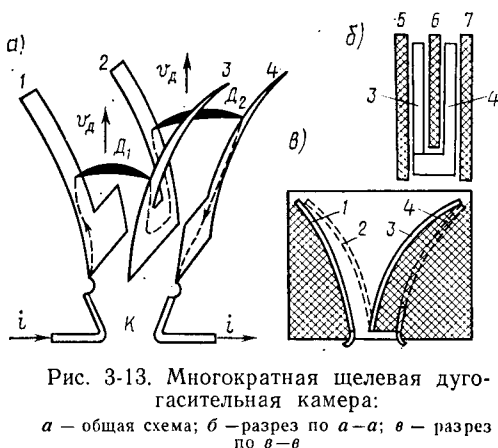


Рис. 3-13. Многократная щелевая дугогасительная камера:

a — общая схема; b — разрез по $a-a$; v — разрез по $v-v$

Дуга с контактов K выдувается на металлические пластины специальной формы, на которых она разбивается на две дуги — D_1 и D_2 . Дуга D_1 направляется на усы 1 и 3, а дуга D_2 — на усы 2 и 4. Усы 1 и 3 располагаются в одной полости асбестоцементной камеры, усы 2 и 4 — в другой полости. Эти полости отделены одна от другой изоляционной перегородкой, которая расположена между усами 2 и 3 и разделяет их. Усы 1—3 и 2—4 расходятся на всю ширину асбестоцементной камеры, в которой они размещаются. Поэтому длины дуг D_1 и D_2 почти равны той, которую имела бы однократная дуга между контактами K такой камеры, но без дополнительных усов и при наличии одной полости. С боковых сторон камера ограничена изоляционными стенками 5, 6 и 7.

Дугогасительная решетка — это пакет из металлических пластин, разделенных воздушными прослойками толщиной в несколько миллиметров. На эти пластины направляется столб дуги, где он интенсивно охлаждается ими. Пластины выполняются из стали; магнитное поле тока дуги замыкается через ферромагнитные пластины, при этом возникает электромагнитная сила вытягивания дуги на пластины решетки. В обычных промышленных образцах решеток (толщина пластин — единицы, мм; число пластин — до 10 шт.) эта сила при токах, равных сотни ампер, со-

ставляет сотые доли ньютона. Однако такие ее значения достаточны для вхождения малоинерционной дуги в решетку.

На рис. 3-14 показаны разновидности пластин дугогасительной решетки. В решетке из простых плоских пластин (рис. 3-14, а) возможно обратное движение отдельных дуг, обусловленных специфическим характером электродинамических сил, действующих на дугу. Электродинамические силы, действующие на дугу I , направлены вверх; участки токов в соседних с ней пластинах создают в зоне дуги I магнитное поле такого направления, от взаимодействия тока дуги с которым появляется сила указанного направления (дуга всегда движется в направлении увеличения размеров петли тока). Для дуги 2 токи в соседних пластинах создают поле противоположного направления и действующая на нее электродинамическая сила направлена вниз.

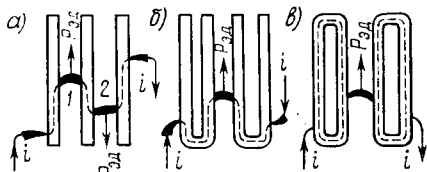


Рис. 3-14. Разновидности пластин дугогасительной решетки

Обратное движение отдельных дуг является недостатком решетки. Чтобы исключить это явление, применяются U-образные пластины (рис. 3-14, б). Скорости движения дуги по таким пластинам высокие и дуги могут выскакивать вверх за пределы решетки. В решетках из О-образных пластин (рис. 3-14, в) этого может не быть, так как благодаря специфическому распределению токов по пластинам действующие на дуги результирующие электродинамические силы изменяют свое направление при подходе дуг к краям решетки. Дуги могут двигаться взад и вперед, не выходя за пределы камеры.

Движение дуги к стальным пластинам решетки вызывает увеличение магнитного потока от тока дуги вследствие уменьшения магнитного сопротивления из-за включения стальных участков на пути потока. В соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея это вызывает появление наведенных токов в пластинах, создающих магнитный поток. По принципу инерции Ленца направление этого потока такое, что результирующая сила стягивания дуги в решетку уменьшается. Поэтому наведенные токи вызывают появление новой составляющей силы от их взаимодействия с током дуги, которая противоположна по направлению стягивающей электромагнитной силе.

Это явление более резко проявляется при переменном токе особенно при токе высокой частоты. На рис. 3-15 приведены зависимости результирующей удельной силы P_0 , действующей на столб дуги единичной длины у края пластин решетки, от частоты тока. Для стальных пластин при частоте тока $f = 3000$ Гц стягивающая сила становится равной нулю, а при более высокой частоте сила взаимодействия наведенных токов в пластинах с током дуги становится больше электромагнитной

силы втягивания дуги в решетку. Для латунных пластин, магнитная проницаемость которых равна проницаемости воздуха, электромагнитная сила отсутствует и при изменяющемся потоке существует лишь отталкивающая сила взаимодействия наведенных токов с током дуги.

Типичные зависимости хода дуги в решетке от времени даны на рис. 3-16 при разной напряженности H внешнего магнитного поля и токе дуги $I = 100$ А. Начальному положению дуги соответствует точка A ($x = 0$, $t = 0$), моменту подхода дуги к пластинам — точка B , C — верхняя граница решетки. Остановка дуги наблюдается у нижнего края пластин решетки, продолжительность которой $t_{н.п}$ для

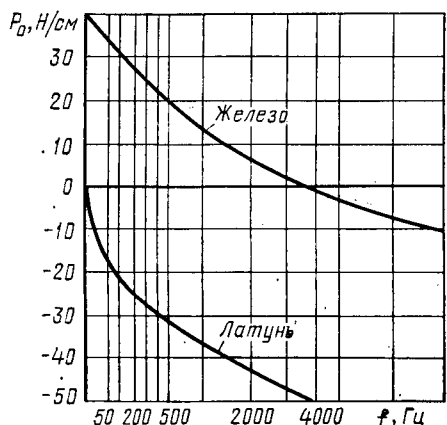


Рис. 3-15. Зависимость силы втягивания дуги в решетку от частоты тока:

$I = 1000$ А, расстояние от дуги до пластины — 2 мм

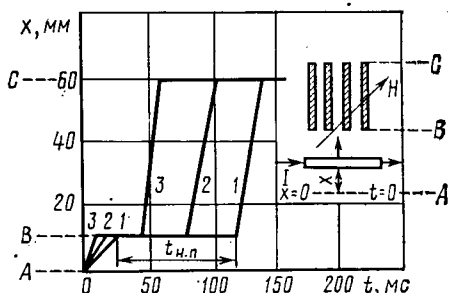


Рис. 3-16. Изменение хода дуги в решетке во времени:

1 — $H = 80$ А/см; 2 — $H = 160$ А/см; 3 — $H = 240$ А/см

В течение времени остановки $t_{н.п}$ столб дуги переходит своими основаниями на пластины решетки. Чтобы этот переход произошел, должны осуществляться два условия. Во-первых, должна прогреться газовая прослойка между столбом дуги и пластинами до температуры, при которой образующиеся на пластинах основания дуги будут способны эмиттировать такое количество электронов, которое способно осуществлять перенос тока. Для этого необходимы температуры оснований до тысячи градусов. Во-вторых, столб дуги должен растянуться в решетке или охладиться до такой степени, чтобы напряжение на нем превышало необходимое для горения дуги в решетке, т. е.

$$U_1 \geq (U_{0.3} + E\delta)(n - 1),$$

где n — число пластин, тогда $(n - 1)$ — число разрывов в решетке; $U_{0.3}$ — околоэлектродное падение напряжения, В; E — градиент напряжения столба дуги, В/см; δ — расстояние между пластинами решетки, см.

Это может быть достигнуто растяжением столба дуг в отдельных разрывах подобно тому, как показано на рис. 3-17. Пока дуга не переходит своими основаниями на пластины, на ней имеется напряжение: $U_2 = El_d^0(n-1)$. Условие перехода дуги в решетку $U_2 \geq U_1$. Отсюда получаем формулу для длины l_d^0 единичной дуги (в одном разрыве), которую она должна приобрести, чтобы основания перешли на пластины решетки:

$$l_d^0 \geq (U_{0.3}/E) + \delta. \quad (3-15)$$

Скорость движения дуги по пластинам решетки (см/с)

$$U_d \approx 1,73\delta^2 \sqrt{I}, \quad (3-16)$$

где δ — расстояние между пластинами, мм; I — ток, А.

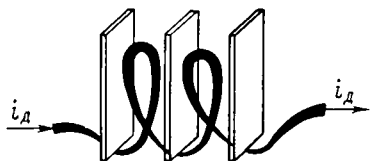


Рис. 3-17. Растяжение дуги в решетке при переходе ее оснований на пластины

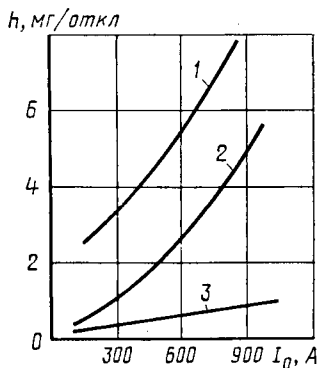


Рис. 3-18. Зависимость плотности образовавшейся двуокиси азота от отключаемого тока:

1 — камера с широкой щелью; 2 — камера с узкой щелью; 3 — дугогасительная решетка

При температуре $T > 1200$ К в воздухе происходит реакция образования оксидов азота NO и NO_2 . Особенно интенсивно она идет при горении дуги, когда $T \gg 1200$ К. Эти оксиды, являясь химически активными, разрушают элементы аппарата, особенно в условиях повышенной влажности, когда образуется азотная кислота. На рис. 3-18 даны зависимости выхода двуоксида азота на одно отключение от значения тока дуги в разных камерах контактора при временах дуги 0,01—0,03 с. Уменьшение ширины щели камеры, применение пламягасительных решеток из стальных пластин на выходе камеры, уменьшение пути движения дуги от контактов до пакета пластин дугогасительной решетки приводит к снижению выхода оксидов азота при гашении дуги.

§ 3-4. ВОССТАНАВЛИВАЮЩАЯСЯ ПРОЧНОСТЬ

Закономерность нарастания во времени восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка аппарата является основной характеристикой дугогасительного устройства. Чтобы технически грамотно конструировать дугогаси-

тельные системы отключающих аппаратов, обосновывать и рассчитывать их параметры, надо знать, от каких факторов и в какой степени зависит восстанавливающаяся прочность.

В процессе восстановления электрической прочности коммутирующий орган аппарата и его межконтактный промежуток превращаются из проводника электрического тока в диэлектрик (изолятор). Этот процесс разбивается на характерные стадии (рис. 3-19).

В стадии I горения дуги межконтактный промежуток также обладает определенной прочностью, под которой понимается

значение напряжения, необходимое для поддержания неизменной проводимости дугового столба. Это понятие базируется на простых предположениях. Если подводимая к дуге мощность, равная квадрату напряжения дуги U_d , деленному на ее сопротивление R_d , больше той мощности, которая отводится от дуги, то условия для существования дуги сохраняются и она развивается. Если происходят обратные соотношения (отводимая от дуги мощность больше мощности, подводимой к ней), то условия для существования

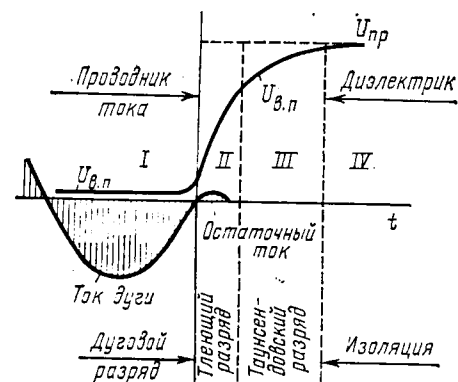


Рис. 3-19. Стадии восстановления электрической прочности

дуги нарушаются и она гаснет. При равенстве этих мощностей наблюдается устойчивое состояние (статическая дуга). Тогда восстанавливающаяся прочность $U_{в.п}$ равняется напряжению дуги. Отсюда

$$U_{в.п} = \sqrt{R_d P_0 I_d}, \quad (3-17)$$

где R_d — сопротивление дуги, Ом; I_d — длина дуги, см; P_0 — мощность, отводимая от единицы длины дуги, Вт/см.

Зависимость (3-15) совместно с формулой (1-8) для сопротивления дугового столба в момент перехода тока через нулевое значение позволяет найти выражение для начальной восстанавливающейся прочности:

$$U_{в.п}^0 = P_0 I_{d_0} \sqrt{2\omega \vartheta I_0}, \quad (3-18)$$

где P_0 и ϑ — удельная отводимая мощность (Вт/см) и постоянная времени дуги, с; I_0 — действующее значение переменного тока, А; ω — угловая частота тока, 1/с.

Наиболее интенсивный рост и большие значения восстанавливающейся прочности достигаются в недуговых стадиях газового разряда, когда в процессе отключения цепи ток уже не

проходит и лишь непосредственно за переходом основного тока через нулевое значение по промежутку может быть небольшой остаточный ток $i_{ост}$ (обычно — миллиамперы).

В стадии II восстанавливающаяся прочность образуется на приэлектродных участках и ее рост определяется отводом теплоты в контактные элементы. Для нее характерен тлеющий разряд; величины прочности соизмеримы с катодным падением напряжения в этом разряде. В стадии III, когда прочность восстанавливается на всей длине газоразрядного столба, характерен таунсендовский разряд, который заканчивается полным разрушением столба и его превращением в изолятор (стадия IV). В IV стадии прочность равна пробивному напряжению холодного промежутка.

Математическая теория восстанавливающейся прочности еще не разработана. Поэтому достоверным остается лишь опытное ее определение по величине пробивного напряжения, вызывающего пробой промежутка в тот или иной момент времени в стадиях II—IV.

Первый метод измерения $U_{в.п}$ (рис. 3-20, а, б) основан на осциллографировании напряжения на коммутирующем элементе А после отключения переменного тока I_0 (за переходом тока через нулевое значение). В момент времени t_1 при напряжении U_1 происходит пробой промежутка. Записанная на катодной осциллограмме кривая напряжения позволяет определить величины U_1 и t_1 , которые характеризуют одну точку кривой восстанавливающейся прочности $U_{в.п} = f(t)$. При неизменном токе I_0 проводится следующий опыт отключения цепи, но уже при новом значении шунтирующей емкости C , которое в сравнении с первым опытом изменяет собственную частоту цепи f_0 и скорость восстановления напряжения. На осциллограмме записывается другая кривая напряжения на промежутке с величинами U_2 и t_2 , соответствующими пробой промежутка. По найденным из ряда осциллограмм значениям U_1-t_1 , U_2-t_2 , U_3-t_3 и другим строится кривая восстанавливающейся прочности $U_{в.п} = f(t)$.

Второй метод измерения (рис. 3-20, в) позволяет в одном опыте отключения тока I_0 снять ряд точек кривой

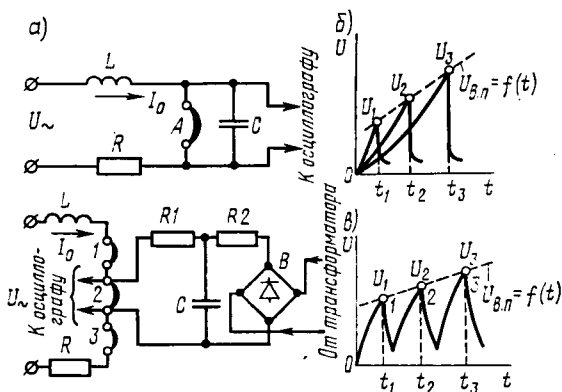


Рис. 3-20. Методы измерения восстанавливающейся прочности

восстанавливающейся прочности и построить непрерывную кривую $U_{в.п} = f(t)$. Метод основан на принципе повторяющихся разрядов емкости на исследуемый промежуток 2 отключаемой цепи, где имеются три разрыва дуги 1, 2, 3. После перехода тока через нулевое значение дуга во всех трех разрывах гаснет и разрывы 1 и 3 гальванически отключают исследуемый промежуток 2 от основной цепи. Емкость C заряжается и при некотором напряжении пробивается промежуток 2 (точка 1). Затем снова следуют подъем напряжения и пробой (точки 2 и 3). Кривая напряжения фиксируется на осциллограмме и по ее вершинам (точки 1, 2, 3) строится непрерывная кривая $U_{в.п} = f(t)$. Скорости заряда конденсатора C (от трансформатора через цепь выпрямителя B) и нарастания напряжения на промежутке 2, а также время и энергия разряда конденсатора на промежуток 2 при его пробое регулируются добавочными резисторами R_1 и R_2 , а также емкостью C . Напряжение на емкости изменяется соответственно зависимостям: при заряде $U_C = U_0 [1 - \exp(-t/R_2 C)]$, при разряде $U_C = U_0 \exp(-t/R_1 C)$.

Для исследования прочности аппаратов низкого напряжения целесообразные значения емкости $C \approx 10 \div 20$ мкФ, $R = 1 \div 4$ МОм, а напряжение конденсатора $U_C = 4 \div 10$ кВ. При обработке осциллограмм и определении опытных значений $U_{в.п}$ в аппаратах низкого напряжения можно допустить, что момент перехода через нулевое значение тока и напряжения дуги совпадают. Тогда отсчет времени на осциллограмме можно производить от момента перехода через нулевое значение напряжения на промежутке, а отсчет пробивного напряжения — от нулевой линии напряжения. Возможность такого условия оправдывается тем, что при анализе процессов дугогашения, а также при расчете дугогасительных устройств обычно сопоставляют между собой кривые U_v и $U_{в.п}$ безотносительно к кривой тока цепи, а при расчетах в качестве начального условия можно принимать, что в начале процесса напряжение на промежутке $U_v = 0$.

Однако изложенные методы измерения $U_{в.п}$ имеют недостатки: применение шунтирующих емкостей изменяет скорость подхода тока к нулю (часть тока отвлекается в емкость) $i_C = CdU_C/dt$. В описанном выше втором методе измерения $U_{в.п}$ выделяемая при разрядах емкости энергия изменяет тепловое состояние исследуемого промежутка и др.

На рис. 3-21 дана полная кривая восстанавливающейся прочности межконтактного промежутка длиной $l = 1,2$ мм в воздухе после отключения тока 300 А (за его последним переходом тока через нулевое значение) вплоть до полного его охлаждения и приобретения пробивного напряжения холодного промежутка $U_{пр} = 4,6$ кВ. Как видно, в аппаратах управления полное восстановление диэлектрических свойств межконтактного промежутка происходит за время порядка 10 мс. Начальная восстанавливающаяся прочность в момент перехода тока через нулевое

значение ($t=0$) составляет десятки вольт, а за время $t=100$ мкс прочность достигает нескольких сотен вольт.

Расчет процессов отключения цепи переменного тока на основе условия гашения дуги (рис. 1-6, а) производится путем сопоставления кривых восстанавливающегося напряжения $U_{в.п}$ и восстанавливающейся прочности $U_{в.п}$ в критическом периоде времени от $t=0$ до $t=t_{кр}$, т. е. при первом подъеме восстанавливающегося напряжения; $t_{кр} = 1,2f_0$.

Характерные значения собственной частоты в сетях низкого напряжения (см. § 1-6) составляют десятки кГц, время $t_{кр}$ определяется десятками микросекунд. Следовательно, в течение времен такого порядка наблюдаются критические условия, когда восстанавливающаяся прочность еще невелика, а напряжение и скорость его роста приобретают наиболее высокие значения. Поэтому для аппаратов управления целесообразно

знать закономерности восстановления прочности в течение времени от нуля до сотен микросекунд за нулевым значением тока.

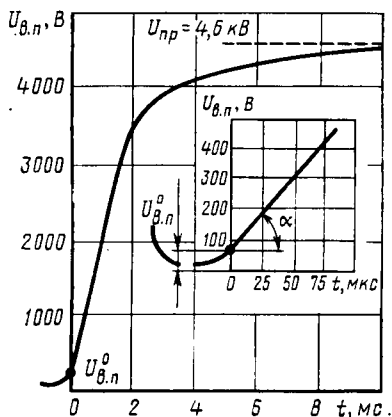


Рис. 3-21. Кривая роста восстанавливающейся прочности

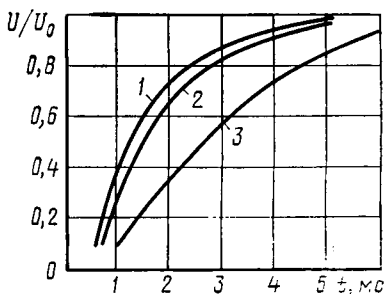


Рис. 3-22. Кривые восстанавливающейся прочности при отключении постоянного тока:

1 — 2000 А, 0,155 Тл; 2 — 200 А, 0,05 Тл; 3 — 2000 А, 0,05 Тл

На рис. 3-21 изображен участок опытной кривой $U_{в.п}=f(t)$ на отрезке времени $t=0 \div 100$ мкс после нулевого значения тока. На нем зависимость $U_{в.п}=f(t)$ является прямолинейной. Опыты показывают, что в пределах времени до 200 мкс в аппаратах управления эти кривые аппроксимируются линейной зависимостью

$$U_{в.п} = U_{в.п}^0 + K_{п}t, \quad (3-19)$$

где $U_{в.п}^0$ — начальная восстанавливающаяся прочность (в момент $t=0$); $K_{п}$ — скорость роста прочности ($K_{п}=tg\alpha$).

На рис. 3-22 даны зависимости восстанавливающейся прочности от времени для условий отключения постоянного тока. По оси ординат отложено отношение пробивного напряжения U остаточ-

ного столба дуги к напряжению U_0 пробоя холодного промежутка. Кривые относятся к разным значениям отключаемого тока I_0 и разной индукции B поля магнитного дутья, которая в совокупности с током обеспечивала ту или иную скорость перемещения дуги во время ее горения.

Столб дуги переменного тока при подходе тока к нулевому значению обладает некоторой прочностью $U_{в.п.}$. За переходом тока через нулевое значение протекает наиболее интенсивный процесс нарастания восстанавливающейся прочности. Этот процесс — монотонный, непрерывный, совершающийся без скачков. Несмотря на то что иногда утверждают о мгновенном восстановлении околокатодной прочности в коротких дугах до величины 150—250 В за нулевым значением тока в условиях так называемого «холодного» промежутка, в действительности не бывает такого холодного состояния в межконтактном промежутке аппарата непосредственно после прекращения тока. Условия переноса тока в этом промежутке определяют разогрев относительно обширных оснований дуги на металлических контактах до нескольких тысяч градусов, а нагрев газа в столбе дуги — до десятков тысяч градусов. В этих условиях нарастание восстанавливающейся прочности определяется только интенсивностью охлаждения оснований дуги и газоразрядного столба (в начале — приэлектродных зон), а через них — снижением интенсивности ионизационных процессов в основаниях дуги и в столбе дуги. Никакого околокатодного эффекта (мгновенного роста прочности) в реальных условиях контактных аппаратов не существует. Единственно справедливой для контак-

ных аппаратов управления является тепловая теория восстанавливающейся прочности. С позиций этой теории объясняются все приводимые ниже зависимости восстанавливающейся прочности от определяющих факторов.

На рис. 3-23 даны зависимости начальной прочности $U_{в.п.}^0$ и скорости роста прочности K_p от отключаемого тока для свободной дуги на медных контактах. Характер зависимости вос-

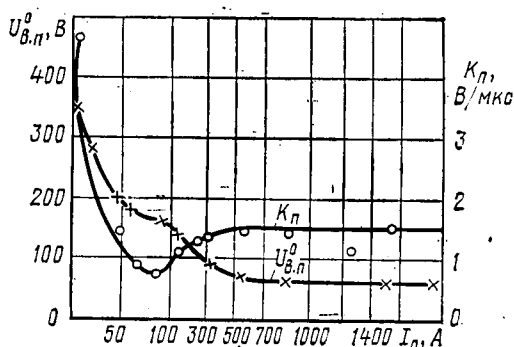


Рис. 3-23. Зависимости начальной прочности $U_{в.п.}^0$ и скорости роста прочности K_p от тока I_0

станавливающейся прочности в условиях свободной дуги таков, что при токах до 60—80 А величина $U_{в.п.}^0$ существенно снижается с ростом тока. Но начиная с тока 60—80 А, это снижение менее заметно и даже происходит увеличение скорости роста прочности K_p . Известно, что при токах до 60—80 А электродинамические си-

лы, способствующие выходу дуги из межконтактного промежутка, малы. При растворах контактов до 20 мм дуга длительное время не выходит из зоны между контактами. С увеличением тока возрастает энергия, выделившаяся в дуге, дуговой столб приобретает большее сечение и почти неподвижные при указанных токах основания дуги на контактах разогреваются сильнее. Это приводит к большому содержанию ионизированных частиц в межконтактном промежутке и снижению его восстанавливающейся прочности. Но если ток увеличивать дальше, то влияние электродинамических сил будет существенным. Это приведет к усилению интенсивности охлаждения столба дуги, к перемещению опорных оснований ее на новые холодные места на поверхности контактов, к улучшению условий восстановления прочности.

Как показывают экспериментальные исследования, восстанавливаемая прочность мало зависит от раствора контактов и длины дуги. С увеличением длины дуги величина $U_{в.п}$ уменьшается. Слабое влияние длины дуги на восстанавливающуюся прочность объясняется тем, что в аппаратах управления на протяжении десятков и первых сотен микросекунд за нулевым значением тока она образуется не на всей длине дугового канала, а лишь в небольшом прикатодном слое протяженностью порядка сотен и даже тысячных долей сантиметра. Когда увеличивается длина дуги, возрастает и запасенная в столбе тепловая энергия, которая частично распространяется в направлении прикатодного слоя, имеющего более низкую температуру по сравнению с основным столбом дуги. Поэтому с увеличением длины дуги восстанавливаемая прочность снижается.

Существенное влияние на восстанавливающуюся прочность могут оказать скорости движения дуги и особенно перемещения ее оснований по контактам. Увеличение скорости движения дуги приводит к повышению восстанавливающейся прочности, что объясняется улучшением условий охлаждения прикатодного слоя дугового столба. Если основания дуги непрерывно перемещаются по контакту и переходят на холодные места, то за переходом тока через нулевое значение они быстро охлаждаются. Это способствует более интенсивному охлаждению прикатодного слоя дугового газа. Кроме того, охлажденный катод не создает потока электронов термоэмиссии, что снижает электропроводность прикатодного участка остаточного столба дуги.

Так как в критическом периоде восстановления напряжения ($0-t_{кр}$) восстанавливаемая прочность образуется в небольшом прикатодном слое газа, то материал контактов и их размеры должны оказывать влияние на величину восстанавливающейся прочности. Чем больше коэффициент теплопроводности λ материала контакта, тем лучше условия теплопередачи в контакте. В этом случае нагретые основания дуги быстрее охлаждаются как до перехода тока через нулевое значение на спаде кривой тока, когда его мгновенные значения невелики, так и за этим

переходом. Основания дуги на контактах из материалов, которым свойственны более высокие теплопроводность и теплоемкость, при прочих равных условиях должны иметь меньшие размеры. Они будут менее прогреты, чем основания дуги на контактах из материалов с меньшей теплопроводностью и теплоемкостью. Следовательно, на контактах из материалов с высокой теплопроводностью восстанавливающаяся прочность выше, чем на материалах с низкой теплопроводностью. Этот вывод подтверждается опытными зависимостями начальной восстанавливающейся прочности $U_{в.п}^0$ от тока I_0 для разных контактных материалов, приведенными на рис. 3-24.

Наибольшие значения $U_{в.п}^0$ свойственны контактам из серебра, которое имеет высокий коэффициент теплопроводности [$\lambda = 4,2$ Вт/(см·град)]. С другой стороны, железо имеет низкий коэффициент теплопроводности [$\lambda = 0,73$ Вт/(см·град)] и величина $U_{в.п}^0$ для него оказывается небольшой. На восстанавливающуюся прочность могут оказывать влияние и такие факторы, как температура кипения материала контакта. Эта температура может оказаться предельной, до которой нагревается основание дуги. Чем выше температура кипения, тем сильнее разогревы основания дуги и интенсивнее поток электронов термоземиссии, что снижает восстанавливающуюся прочность. Возможно, что этим объясняются очень низкие значения $U_{в.п}^0$ для контактов из композиции „серебро-графит“ (кривая 7 на рис. 3-24), в которых графитовая составляющая имеет очень высокую температуру кипения. Сравнительно высокое положение кривой $U_{в.п}^0 = f(I_0)$ для латунных контактов может быть объяснено деионизирующим действием паров цинка, входящих в состав латуни.

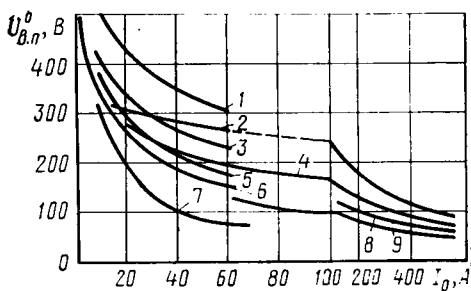


Рис. 3-24. Зависимости начальной восстанавливающейся прочности от тока различных контактных материалов: 1 — Ag; 2 — латунь; 3 — Ag — Ni; 4 — Cu; 5 — Ag — W; 6 — Ag — CdO; 7 — Ag — C; 8 — Al; 9 — Fe

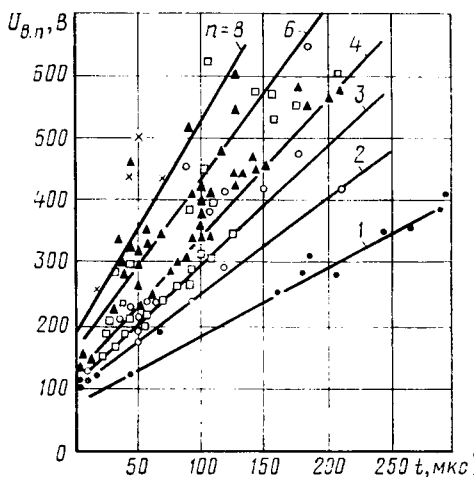


Рис. 3-25. Кривые роста восстанавливающейся прочности в дугогасительной решетке при разном числе разрывов n

Зависимости восстанавливающейся прочности от времени для дугогасительной решетки даны на рис. 3-25. Они относятся к отключаемому току $I_0 = 350$ А и разному числу пластин n . Как показывают опыты, *восстанавливающаяся прочность в решетке* и положение кривой $U_{в.п} = f(t)$ на графике почти не зависят от величины отключаемого тока. С возрастанием тока увеличиваются как размеры дугового столба, так и скорость его перемещения по пластинам решетки. В совокупности эти факторы, видимо, и приводят к примерно одинаковой прочности межконтактного промежутка при прочих равных условиях.

По опытным данным построены зависимости начальной восстанавливающейся прочности $U_{в.п}^0$ и скорости роста прочности в решетке K_n от числа разрывов n решетки (рис. 3-26). *Линейной зависимости величины $U_{в.п}^0$ и K_n от числа разрывов не наблюдается.* С увеличением числа n средние значения $U_{в.п}^0$ и K_n уменьшаются. Это очень важный вывод, который расходится с существовавшими до недавнего времени представлениями о процессах в дугогасительной решетке. Отсюда следует, что около каждой пластины не создаются идентичные условия восстановления электрической прочности и в разных промежутках решетки величина прочности неодинакова.

Причиной различия величин $U_{в.п}^0$ и K_n в отдельных промежутках решетки, по-видимому, является разная скорость движения отдельных дуг между пластинами. Это вызвано специфическим характером распределения электродинамических сил, действующих на отдельные дуги в решетке. Если одни дуги уйдут несколько вперед, а другие отстанут, то распределение линий тока через все промежутки такое, что электродинамические силы ускоряют движение ушедших вперед дуг и тормозят движение оставших дуг. Если скорости движения отдельных дуг различны по величине, то проводимости соответствующих прикатодных слоев из-за различной температуры катодов не одинаковы, что в свою очередь обуславливает неодинаковую прочность промежутков решетки.

Всякий тепловой пробой газового промежутка связан с прохождением тока через него. В момент перемены знака (у нуле-

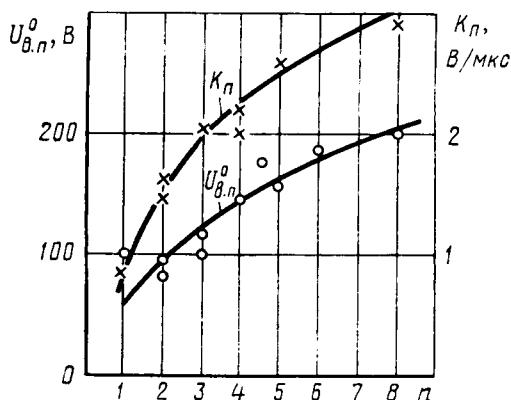


Рис. 3-26. Начальная восстанавливающаяся прочность и скорость роста прочности в функции числа разрывов решетки:

$\Delta_n = 2$ мм; $\delta_n = 5$ мм; $I_0 = 350$ А

вого значения тока) напряжение на всех последовательно соединенных промежутках равно нулю. Допустим, что оно повышается затем до величины, достаточной для начала теплового пробоя (разогрева) наиболее прочного промежутка, имеющего самое высокое остаточное сопротивление и соответственно наиболее высокую прочность. По всем последовательно соединенным промежуткам проходит одинаковый относительно небольшой ток. Если сопротивление, например, трех последовательных промежутков представить в соотношении $R_1:R_2:R_3=1:10:100$, то выделяемые в них мощности будут находиться в том же соотношении $P_1:P_2:P_3=I^2R_1:I^2R_2:I^2R_3=I^2:10I^2:100I^2$. Основная мощность и основное напряжение придутся в начале на наиболее прочный третий промежуток (R_3). Он начнет пробиваться (разогреваться), т. е. снижать свои сопротивления и прочность. Напряжение начнет существенно перераспределяться лишь после того, как сопротивление в начале наиболее прочного промежутка станет соизмеримым с сопротивлением других промежутков и ток в последовательной цепи промежутков увеличится.

Таким образом, в процессе теплового пробоя происходит последовательное снижение прочности промежутков решетки. Вначале пробиваются промежутки с наиболее деионизированным остаточным столбом и лишь потом пробиваются другие, менее прочные, промежутки, когда сопротивления первых становятся соизмеримыми с сопротивлениями вторых. Такой характер пробоя становится более наглядным, если рассматривать два последовательных промежутка с резко различными остаточными сопротивлениями (и соответственно прочностями).

Чем чаще аппарат отключает электрическую цепь, тем больше тепловой энергии выделяется в его дугогасительной системе и тем сильнее нагреваются пластины дугогасительной решетки. Повышение температуры нагрева пластин приводит к некоторому ухудшению условий передачи теплоты от оснований дуги и снижению скорости восстанавливающейся прочности. По этой причине наблюдаются отказы дугогасительной решетки в гашении дуги при большой частоте коммутаций. Восстанавливающаяся прочность в щелевых дугогасительных камерах нарастает так же, как и в других видах дугогасительных устройств по закону (3-17).

На рис. 3-27 даны зависимости начальной восстанавливающейся прочности $U_{в.п}^0$ и скорости роста прочности $K_{п}$ в щелевых асбоцементных камерах от отключаемого тока. В исследованных диапазонах тока и ширины щели камеры материал камер практически не оказывает влияния на величину $U_{в.п}$, поэтому зависимости, изображенные на рис. 3-27, пригодны для щелевых камер, изготовленных из разных материалов. При токах до 60—80 А значения $U_{в.п}^0$ и $K_{п}$ с ростом тока падают довольно резко. Но начиная с указанных значений тока степень уменьшения $U_{в.п}^0$ и $K_{п}$ с ростом тока значительно меньше. Это объясняется уве-

личением электродинамических усилий, воздействующих на дугу и перемещающих ее вместе с основаниями по контактам. Условия охлаждения столба дуги и ее оснований улучшаются. Поэтому при $I > 60 - 80$ А не наблюдается большого снижения величин $U_{в.п}^0$ и $K_{п}$ с ростом тока. Из рис. 3-27 следует, что уменьшение ширины щели камеры также повышает восстанавливающую прочность вследствие улучшения условий охлаждения дуги.

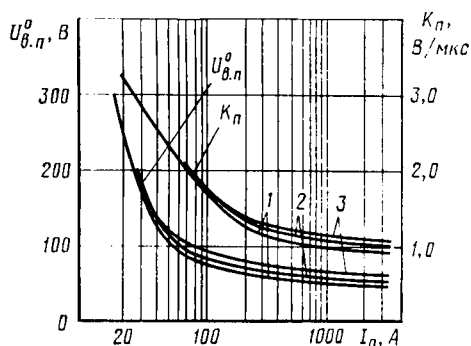


Рис. 3-27. Зависимости $U_{в.п}^0 = f(I_0)$ и $K_{п} = f(I_0)$ для щелевых камер:
1 — $\delta = 12$ мм; 2 — $\delta = 8$ мм; 3 — $\delta = 4,5$ мм

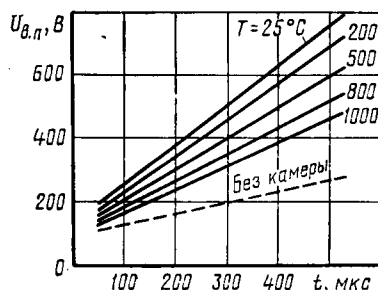


Рис. 3-28. Зависимость $U_{в.п}$ от времени t для щелевой камеры при разной температуре стенок:
 $I_0 = 1000$ А; $\delta = 5$ мм

Существенное влияние на $U_{в.п}$ в щелевых камерах оказывает температура изоляционных стенок, которые охлаждают столб дуги. На рис. 3-28 даны кривые $U_{в.п} = f(t)$ при разной температуре стенок, с которыми дуга тесно соприкасается. С повышением температуры стенок условия охлаждения дуги и ее электродных зон ухудшаются, а $U_{в.п}$ — снижается.

Если проанализировать изложенные выше зависимости восстанавливающейся прочности от разных факторов, то можно сделать вывод, что в аппаратах управления не наблюдается резкой зависимости восстанавливающейся прочности от изменения тех или иных параметров в широких пределах. Существенное повышение восстанавливающейся прочности можно получить в основном путем непрерывного перемещения оснований дуги по контактам или путем фиксированного размыкания контактов аппарата непосредственно перед переходом тока через нулевое значение.

Дугогасительная камера в аппаратах управления переменного тока в основном повышает активное сопротивление дуги в процессе ее гашения, имеющее существенные значения по сравнению с сопротивлением отключаемой цепи. В результате оно ограничивает величину тока и приводит к уменьшению условного угла сдвига фаз между током и напряжением в отключаемой цепи.

Создаются благоприятные условия гашения дуги переменного тока, так как уменьшение условного угла сдвига фаз снижает восстанавливающееся напряжение на контактах отключающего аппарата. В этом заключается *основное функциональное значение дугогасительной камеры в аппаратах низкого напряжения переменного тока.*

§ 3-5. РАСЧЕТ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Расчет дугогасительных устройств постоянного тока проводится на основе известного условия гашения дуги постоянного тока: вольт-амперная характеристика дуги должна лежать на графике выше реостатной характеристики цепи. В критических условиях эти характеристики должны касаться друг друга в одной точке.

На рис. 3-29 изображены необходимые графические построения при двух вариантах расчета. В варианте (рис. 3-29, а) заданы параметры дугогасительного устройства и, следовательно, вольт-амперная характеристика электрической дуги $U_d = f(i_d)$, обычно рассчитываемая по эмпирической формуле. Требуется найти величину отключаемого тока при заданном напряжении сети или наоборот. Пусть задано напряжение сети U_0 . Тогда, проводя из точки U_0 касательную к вольт-амперной характеристике дуги, найдем величину отключаемого тока I_x . Если известен отключаемый ток I_0 , то проведенная из соответствующей точки касательная к кривой $U_d = f(i_d)$ отсечет на оси напряжений искомую величину напряжения сети U_x .

Для решения обратной задачи, когда заданы напряжение источника U_0 и отключаемый ток I_0 , на графике наносится заданная реостатная характеристика цепи (прямая $U_0 - I_0$ на рис. 3-29, б). Должна быть известна эмпирическая или аналитическая зависимость между током i_d и напряжением дуги U_d в данном дугогасительном устройстве. Требуется подобрать параметры дугогасительного устройства так,

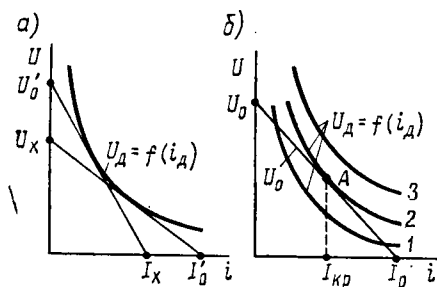


Рис. 3-29. Варианты расчета дугогашения на постоянном токе

чтобы кривая $U_d = f(i_d)$ легла несколько выше реостатной характеристики цепи или коснулась бы ее в пределах одной точки. *Оптимальным условиям* соответствует расчетная кривая 2 при критической длине дуги $l_{кр}$. Кривая 1 не обеспечивает условия погасания дуги, кривая 3 соответствует условиям, когда в дугогасительном устройстве

создан неоправданно большой запас по коммутационной способности.

При токах до 20—30 А вольтамперная характеристика открытой дуги выражается зависимостью (В)

$$U_d = U_0 + C(10^{-5}p)^m i_d^{-n} l_d. \quad (3-20)$$

Здесь $U_{0,3} = 20 \div 30$ В — околосветовое падение напряжения, В; p — давление газа, Па; i_d — ток дуги, А; l_d — длина дуги, см. Значения C , n и m для разных газов указаны ниже:

Газы и воздух	C	n	m
Водород	400	0,7	0,32
Углекислый газ	100	—	—
Воздух	92	0,5	0,31
Азот	90	0,6	0,31
Аргон	35	0,53	0,16
Гелий	180	0,72	0,2

Простой вид зависимости (3-20) позволяет аналитическим путем определить длину дуги, необходимую для погасания дуги при заданных токе отключения I_0 и напряжении источника U_0 , если зависимость (3-20) представить в виде $U_d = C_1 i_d^{-n} l_d$, где $C_1 = (10^{-5}p)^m C$ (влияние околосветового падения напряжения не учитывается). Выражение для реостатной характеристики в пределах тока $i = 0 \div I_0$:

$$U_p = U_0 [1 - (i/I_0)]. \quad (3-21)$$

Критические условия, соответствующие критической длине дуги $l_{кр}$ и касанию кривых $U_d = f(i)$ и $U_p = f(i)$ в одной точке A на рис. 3-29, б, выражаются при $i = I_{кр}$ зависимостями: $dU_d/di = dU_p/di$ и $U_p = U_d$.

Из этих соотношений с учетом (3-20) и (3-21) получаем

$$\begin{aligned} -nC_1 I_{кр}^{-n-1} l_{кр} &= -U_0/I_0; \\ U_0 [1 - I_{кр}/I_0] &= C_1 I_{кр}^{-n} l_{кр}. \end{aligned}$$

Исключая из этих уравнений $I_{кр}$, находим формулу для критической длины дуги, необходимой для ее погасания при токах до 20—30 А:

$$l_{кр} = [n^n / (n+1)^{n+1}] \{U_0 I_0^n / [C(10^{-5}p)^m]\}. \quad (3-22)$$

Подставив сюда постоянные C и n для воздуха, получим (при атмосферном давлении)

$$l_{кр} = 0,42 \cdot 10^{-2} U_0 \sqrt{I_0},$$

где U_0 — напряжение источника, В; I_0 — отключаемый ток, А.

Формулу (3-20) можно использовать для определения раствора контактов аппарата, обеспечивающего гашение дуги при малых токах. Для выбора расстояния между контактами, необходимого для погасания дуги постоянного тока в воздухе при разных отключаемых токах I_0 и напряжениях источника U_0 , можно использовать также кривые (рис. 3-30).

Для практических расчетов дугогасительных устройств постоянного тока необходимо иметь их вольтамперные характеристики, выраженные в виде экспериментальных кривых или эмпирических формул.

Аналитических данных по таким характеристикам пока не существует. На рис. 3-31, а показана зависимость градиента напряжения E_d (В/см) свободной дуги в воздухе от тока по различным данным. Если такая дуга перемеща-

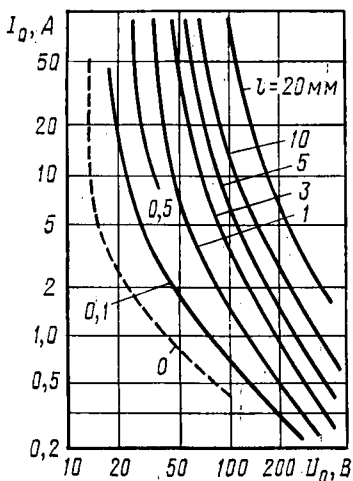


Рис. 3-30. Области надежного гашения дуги постоянного тока

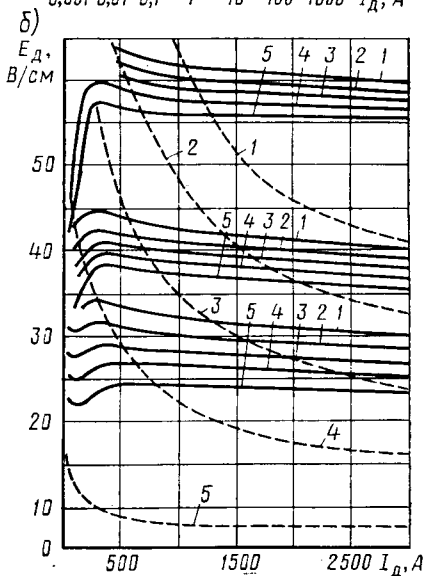
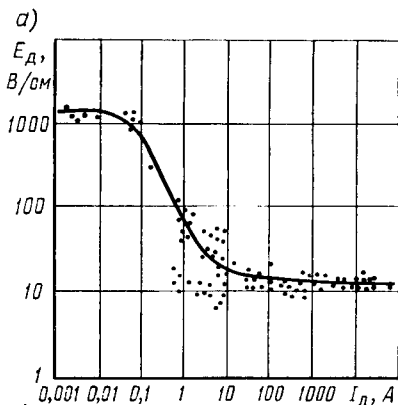


Рис. 3-31. Статические характеристики дуги в воздухе (а) и в шелевой камере (б)

ется в воздухе со скоростью v_d (см/с), то зависимость при токе i_d (А) имеет вид

$$E \approx (92 + 0,092v_d)/\sqrt{i_d}. \quad (3-23)$$

Скорость дуги определяется по соотношениям, приведенным в § 3-3.

Для определения напряжения дуги при известном градиенте необходимо знать длину дуги l_d , (так как $U_d = E l_d$). Для упрощенных форм дуги, изображенных на рис. 3-7, длина

$$l_d = \sqrt{\beta^2 + 9v_d^2 t^2},$$

где β — расстояние между контактами, см; v_d — скорость дуги, см/с; t — время, с.

Опытные вольтамперные характеристики дуги в щелевых камерах даны на рис. 3-31, б. Они представлены для разной ширины щели δ ($A - \delta = 1$ мм; $B - \delta = 2$ и $B - \delta = 4$) и разных скоростей дуги в камере ($1 - 200$ м/с, $2 - 150$, $3 - 100$, $4 - 50$, $5 - 9$). На том же рисунке пунктирными линиями представлены зависимости $E_d = f(i_d)$ для свободной дуги ($\delta = \infty$) при вышеуказанных скоростях ее движения соответственно обозначениям $1-5$.

Для расчетов щелевых камер можно использовать эмпирические формулы, выражающие вольтамперную характеристику дуги в щелевых камерах. Для камер с широкой щелью, когда диаметр дуги $d < \delta$ (В/см)

$$E \approx (92/\sqrt{i_d}) + (0,312\sqrt{i_d}\delta^{2/3}) + (0,37\sqrt[3]{v_d^2/i_d}). \quad (3-24)$$

Для камер с узкой щелью ($d > \delta$)

$$E \approx (92/\sqrt{i_d}) + (0,312\sqrt{i_d}\delta^{2/3}) + (7 \cdot 10^{-4}\sqrt[3]{v_d^2 i_d/\delta^2}), \quad (3-25)$$

где i_d — ток, А; δ — ширина щели, см; v_d — скорость движения дуги, см/с.

Чтобы определить, к какому виду (с узкой или широкой щелью) отнести данную камеру с шириной щели δ при заданном токе I_0 , можно воспользоваться зависимостью (3-13). Если соблюдается неравенство $\delta > 1,12\sqrt{I/(20 + v_d)}$, камеру следует отнести к широкощелевой, если не соблюдается — к узкощелевой.

Зависимость напряжения дуги от тока на одном разрыве дугогасительной решетки из стальных пластин толщиной 2 мм и расстоянии между ними $\delta = 3$ мм представлены на рис. 3-32 (кривая 1). На этом рисунке дана также зависимость напряжения дуги на одном разрыве решетки от расстояния между пластинами δ при токе 10 кА (кривая 2).

Рассмотренным дугогасительным устройствам свойственны неодинаковые градиенты напряжения дуги. Для сравнения приведем значения этих градиентов E (В/см) при различных способах гашения дуги (для постоянного тока $I_0 = 2000$ А):

Простое растяжение	8
Гашение дуги поперечным магнитным полем	40
„ в дугогасительной решетке	50
„ в щели ($\delta=1$ мм)	80
„ в щели ($\delta=0,5$ мм)	100

Для простейшей схемы цепи постоянного тока (рис. 3-33, а) с электрической дугой справедливо уравнение

$$U_0 = (iR + L di/dt + U_d).$$

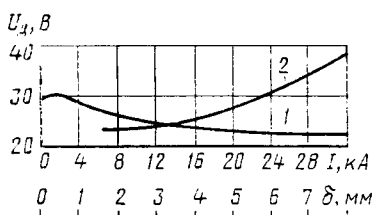


Рис. 3-32. Зависимости напряжения дуги в решетке от тока I и от расстояния между пластинами 2

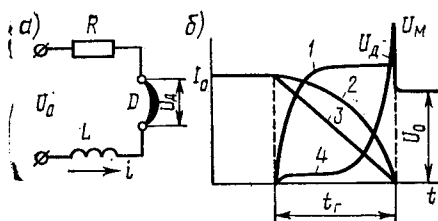


Рис. 3-33. Характер перенапряжений при гашении дуги постоянного тока

Из него для напряжения дуги имеем

$$U_d = (U_0 - iR) - L di/dt.$$

Максимальное напряжение — перенапряжение обычно возникает в конце процесса гашения дуги ($i=0$):

$$U_{\max} = U_0 + L di/dt. \quad (3-26)$$

Знак «+» здесь обусловлен отрицательным значением производной di/dt при гашении дуги. Если ток при гашении дуги изменяется во времени по закону (рис. 3-33, б) $i_d = I_0 \{1 - (t/t_r)^n\}$, то перенапряжение

$$U_{\max} = U_0 (1 + nLI_0/U_0 t_r). \quad (3-27)$$

Здесь U_0 — напряжение источника, В; I_0 — начальное значение отключаемого тока, А; L — индуктивность цепи, Гн; t_r — время дуги, с.

Используя выражение для постоянной времени цепи $\tau_s = L/R$ и тока $I_0 = U_0/R$, из (3-27) находим

$$U_{\max} = U_0 (1 + n\tau_s/t_r). \quad (3-27a)$$

На рис. 3-33, б кривой 3 изменения тока $i_d = f(t)$ соответствует кривая 1 изменения напряжения $U_d = f(t)$, кривой 2 — кривая 4.

Условия отключения постоянного тока оптимальны, если выделяемая в дуге энергия минимальна, а перенапряжение во время процесса гашения дуги близко к допустимому по уровню изоляции ($U_{доп}$):

$$W_d = \int_0^{t_r} u_d i_d dt \rightarrow \min, \quad u_d \leq U_{доп}.$$

Энергия дуги при частых отключениях может нагреть дугогасительную камеру до высокой температуры. Умножим обе части уравнения баланса напряжений на idt :

$$U_0 idt = i^2 R dt + L di + U_d idt.$$

В процессе гашения дуги ток изменится от I_0 до 0. Обозначим t_r время гашения дуги и проинтегрируем последнее уравнение:

$$\int_0^{t_r} U_0 idt = \int_0^{t_r} i^2 R dt + L \int_{I_0}^0 idt + \int_0^{t_r} U_d idt.$$

Здесь левая часть равенства представляет собой энергию, поступившую от источника тока за время гашения дуги; правая часть определяет: первый член — энергию, ушедшую на нагрев сопротивления нагрузки, второй член — электромагнитную энергию, запасенную в индуктивности, третий член — энергию дуги.

Решим это уравнение относительно энергии дуги:

$$W_d = \int_0^{t_r} U_d idt = \int_0^{t_r} (U_0 i - i^2 R) dt - L \int_{I_0}^0 idt.$$

Допустим, что в процессе гашения дуги ток снижается до нуля по прямолинейному закону $i = I_0(1 - t/t_r)$. Подставив это выражение в предыдущее и проинтегрировав его, получим формулу для энергии дуги, выделившейся при одном цикле гашения:

$$W_d = (U_0 I_0 t_r / 6) + L I_0^2 / 2, \quad (3-28)$$

где t_r — время горения дуги, с.

Используя выражение для постоянной времени τ_s , находим

$$W_d = U_0 I_0 [(t_r / 6) + \tau_s / 2]. \quad (3-29)$$

Предположим, что вся эта энергия уходит на нагрев стенок дугогасительной камеры. Тогда температура нагрева стенок камеры T в установившемся режиме

$$ZW_d = 3600K_T S_6 (T - T_{\text{окр}}),$$

где Z — число операций отключения в час; W_d — энергия дуги, Вт·с; K_T — коэффициент теплопередачи со стенок камеры [$\sim 15 \times 10^{-4}$ Вт/(см²·град)]; S_6 — боковая поверхность охлаждения камеры, см²; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, °С.

Из вышеприведенного уравнения

$$T = T_{\text{окр}} + ZW_d / 3600K_T S_6. \quad (3-30)$$

Распространенным практическим вариантом расчета дугогасительных камер постоянного тока является такой, при котором заданы геометрические размеры камеры и для нее требуется определить предельный отключаемый ток при том или ином напряжении источника. Решение проводится по варианту *a* (см. рис. 3-29, *a*). Для предельно возможного положения дуги в камере определяется ее возможная длина, рассчитывается и на график наносится соответствующая ей вольтамперная характеристика дуги. Методом построения касательной определяется предельный ток I_x при заданном U_0 или напряжение U_x при заданном токе I_0 .

Пример. Рассчитать время гашения открытой дуги постоянного тока, ее энергию и перенапряжения в цепи с напряжением $U_0 = 220$ В, током $I_0 = 150$ А и постоянной времени $\tau_9 = 10$ мс. Контакты рычажного типа, один разрыв (рис. 3-7, *a*).

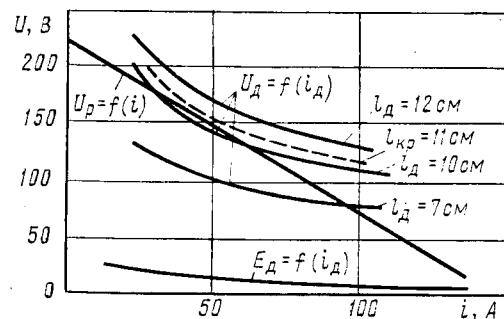


Рис. 3-34. Варианты расчета критической длины дуги на постоянном токе:
 $U_0 = 220$ В и $I_0 = 150$ А

Требуется также определить, до какой температуры нагрелась бы асбестовая камера с площадью наружной поверхности $S_6 = 200$ см², если бы в ней разместить контактную систему и производить отключения с частотой $Z = 600$ 1/час.

Решение. Вольтамперную характеристику дуги в заданных условиях определяем зависимостями (3-11) и (3-23), из которых

$$E_d = (92 + 0,092 \cdot 2,12 i_d \sqrt{\beta}) / \sqrt{i_d}.$$

На графике (рис. 3-34) по заданным U_0 и I_0 построена реостатная характеристика цепи $U_p = f(I)$, а также вольтамперная

характеристика дуги единичной длины ($l_d = 1$ см) $E_d = f(i_d)$ по приведенной формуле.

Используя кривую $E_d = f(i_d)$, строим ряд зависимостей напряжения дуги от тока $U_d = f(i_d)$ при разных длинах дуги. Из построения находим, что при $l_d = 11$ см условие гашения дуги выполняется. Следовательно, $l_{kr} = 11$ см.

Для заданной формы контактов (рис. 3-7, *a*) длина дуги $l_d = \sqrt{\beta^2 + 9v_d^2 t^2}$.

Время гашения дуги t_{Π} соответствует достижению критической длины дуги $l_{кр}$. С учетом (3-11)

$$t_r = \sqrt{\beta (I_{кр}^2 - \beta^2)} / 3 \cdot 2,14 I_d.$$

Принимая среднее значение тока i_d в процессе отключения $i_d = I_0/2$ (изменяется от I_0 до нуля), находим

$$t_r = \frac{\sqrt{\beta (I_{кр}^2 - \beta^2)}}{3 \cdot 2,14 (I_0/2)} = \frac{\sqrt{1(11^2 - 1)}}{3 \cdot 2,14 (150/2)} = 0,023 \text{ с.}$$

Энергия дуги

$$W_d = U_0 I_0 [(t_r/6) + (\tau_3/2)] = 220 \cdot 150 [(0,023/6) + (0,01/2)] = 300 \text{ Дж.}$$

Перенапряжение при прямолинейном изменении тока по (3-27 а) для $n=1$:

$$U_{\max} = U_0 (1 + \tau_3/t_r) = 220 (1 + 0,01/0,023) = 315 \text{ В.}$$

По (3-30) определяем температуру нагрева изоляционной камеры при заданных условиях

$$T = T_{\text{окр}} + \frac{Z W_d}{3600 K_{\tau} S_6} = 35 + \frac{600 \cdot 300}{3600 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 200} = 201^{\circ}\text{C.}$$

§ 3-6. РАСЧЕТ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Расчет дугогасительных устройств переменного тока проводится на основе известного условия гашения дуги переменного тока, выражающегося соотношением кривых восстанавливающихся прочности и напряжения. Если за переходом тока через нулевое значение первая кривая находится на графике $u = f(t)$ выше второй, то дуга гаснет. Критические условия возникают тогда, когда указанные кривые касаются друг друга в одной точке.

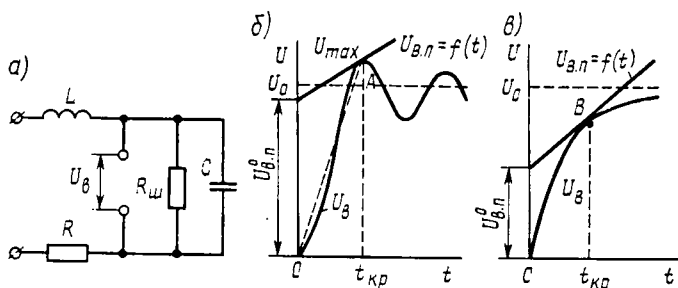


Рис. 3-35. Схема цепи и соотношение расчетных кривых при расчете дугогашения на переменном токе

В зависимости от соотношения параметров типичной отключаемой цепи (рис. 3-35, а) может наблюдаться колебательный (рис. 3-35, б) или аperiodический (рис. 3-35, в) процесс восстановления напряжения. Условия гашения дуги для того и другого вида этого процесса изображены на рис. 3-35. Из теории

восстанавливающегося напряжения известно, что для одночастотного контура (рис. 3-35, *а*) условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodический имеет вид

$$R_{ш} \leq (1,2) \sqrt{L/C} \text{ при } R = 0.$$

Обычно в аппаратах управления шунтирующим сопротивлением является остаточное сопротивление столба $R_{ост}$. Вызав индуктивность L через собственную частоту f_0 по (1-13), получим условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodической $R_{ост} \leq \pi f_0 L$, где $R_{ост} = R_{ш}$.

При заданном напряжении источника $U_{ном}$, отключаемом токе I_0 и коэффициенте мощности $\cos \varphi$ индуктивность

$$L = (U_{ном} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}) / \omega I_0.$$

Тогда условие перехода приобретает вид

$$R_{ост} \leq [\pi f_0 U_{ном} / (\omega I_0)] \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (3-31)$$

Выше установлено, что восстанавливающаяся прочность в дугогасительных устройствах аппаратов управления на отрезке времени от 10 до нескольких сотен микросекунд за переходом тока через нулевое значение выражается зависимостью (3-19).

В первый подъем восстанавливающегося напряжения при колебательном процессе (рис. 3-35, *б*) согласно (1-12)

$$(dU_B / dt)_{ср} = 2f_0 K_a U_0,$$

где f_0 — собственная частота цепи; K_a — коэффициент превышения амплитуды; U_0 — напряжение источника в момент перехода тока через нулевое значение, называемое возвращающимся напряжением промышленной частоты.

Используя (1-12), можно принять следующую формулу для определения восстанавливающегося напряжения во время первого его подъема при колебательном процессе $U_B = (dU_B / dt)_{ср} t$.

Коэффициент амплитуды K_a , равный отношению первого пика восстанавливающегося напряжения U_{max} к напряжению U_0 для дугогасительных устройств со свободной дугой, выражается эмпирической формулой:

$$K_a = U_{max} / U_0 \cong 1 + \exp(-0,0003 f_0). \quad (3-32)$$

В критическом случае условие гашения дуги переменного тока выражается математически двумя равенствами:

$$U_B = U_{в.п} \text{ и } dU_B / dt = dU_{в.п} / dt. \quad (3-33)$$

При колебательном процессе справедливость этих соотношений соблюдается в точке *А* (рис. 3-35, *б*), расположенной обыч-

но вблизи первого амплитудного значения (пика) восстанавливающегося напряжения.

Условие гашения дуги (3-33) для колебательного процесса восстановления напряжения выражается более конкретной математической зависимостью, если использовать формулы (3-19), (3-32) и др.:

$$K_a U_0 \leq U_{в.п}^0 + K_n \cdot 10^6 / 2f_0. \quad (3-34)$$

Здесь знак равенства заменен знаком неравенства для учета того, что дуга переменного тока погаснет, если кривая $U_{в.п}$ находится выше кривой $U_{в.}$.

Закономерность восстановления напряжения при апериодическом процессе выражается следующей аналитической формулой (без учета влияния параметров R и C):

$$U_{в} = U_0 [1 - \exp(-R_{ост} t / L)].$$

В соответствии с (3-33) условие гашения дуги переменного тока при апериодическом процессе восстановления напряжения приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} U_0 [1 - \exp(-R_{ост} t_{кр} / L)] &= U_{в.п}^0 + K_n t_{кр} \cdot 10^6; \\ U_0 (R_{ост} / L) \exp(-R_{ост} t_{кр} / L) &= K_n \cdot 10^6. \end{aligned} \right\} \quad (3-35)$$

Из теории восстанавливающегося напряжения известно, что возвращающееся напряжение согласно (1-10)

$$U_0 = \sqrt{(2/3)} K_{сх} U_{ном} \sin \varphi;$$

здесь $U_{ном}$ — номинальное (линейное) напряжение сети, B ; φ — угол сдвига фаз между током и напряжением цепи.

Коэффициент схемы $K_{сх}$ зависит от схемы включения аппарата в сеть. При отключении трехфазной цепи трехполюсным аппаратом $K_{сх} = 1,5$, при отключении однофазной цепи (на линейном напряжении) двухполюсным аппаратом $K_{сх} = 0,865$, при отключении однофазной цепи (на линейном напряжении) однополюсным аппаратом $K_{сх} = 1,73$, при отключении трехфазной цепи трехполюсным аппаратом при глухом заземлении нейтральной точки источника и нулевой точки нагрузки $K_{сх} = 1,0$.

Синус условного угла сдвига фаз между током дуги и напряжением источника, обусловленного влиянием эквивалентного активного сопротивления дуги $R_{д.э}$, равен (см. § 1-2)

$$\sin \varphi_x = X_0 / \sqrt{X_0^2 + (R_0 + R_{д.э})^2}.$$

Эту зависимость можно выразить приближенной формулой:

$$\sin \varphi_x \approx (1,1 - 0,38 I_0 R_{д.э} / U_{ном}) \sqrt{1 - \cos \varphi_0}, \quad (3-36)$$

где I_0 — начальное значение отключаемого тока (при замкнутых контактах), A ; φ_0 — начальный угол сдвига фаз между током и напряжением (при замкнутых контактах), град.

Открытый разрыв дуги в воздухе. В заданных условиях отключения цепи требуется определить число разрывов n на полюс аппарата, обеспечивающее надежное гашение дуги. При колебательном процессе восстановления напряжения и при равномерном распределении напряжения по разрывам условие гашения дуги (3-34) приводится к виду

$$K_a U_0 \leq n_k (U_{в.п.}^0 + \beta_k K_n \cdot 10^6 / 2f_0).$$

Коэффициент β_k учитывает влияние контактного материала на скорость восстановления прочности (табл. 3-4).

Т а б л и ц а 3-4

Частота источника, Гц	Материал контактов							Примечание
	медь	латунь	серебро	Ag—CgO	Ag—W	Ag—Ni	Ag—C	
50	1,0	0,8	2,0	2,0	1,6	2,0	0,7	Обгоревшие контакты
	1,0	1,0	3,5	6,0	1,6	3,2	0,7	Зачищенные контакты
2500	1,0	1,3	1,1	1,5	1,4	1,2	1,5	

Подставим в это неравенство вместо U_0 зависимость (1-10), в которой $\sin \varphi$ выразим через (3-35). Эквивалентное сопротивление дуги представим через произведение длины дуги l_d^0 на одном разрыве на удельное эквивалентное сопротивление R_d^0 , отнесенное к единице длины дуги. В результате получим *выражение для числа разрывов n_k на полюс аппарата при колебательном процессе* восстановления напряжения:

$$n_k \geq \frac{1,8 U_{ном}}{0,62 I_0 R_d^0 l_d^0 + (2 U_{в.п.}^0 f_0 + \beta_k K_n 10^6) / (K_a K_{сх} f_0 \sqrt{1 - \cos \varphi_0})}. \quad (3-37)$$

Выражение для числа разрывов на полюс аппарата при апериодическом процессе найдем, используя условия гашения дуги (3-35):

$$\left. \begin{aligned} n_a (U_{в.п.}^0 + \beta_k K_n 10^6 t_{кр}) &= U_0 [1 - \exp(-R_{ост} t_{кр} / L)]; \\ U_0 (R_{ост} / L) \exp(-R_{ост} t_{кр} / L) &= n_a \beta_k K_n 10^6. \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

На основе опытных данных остаточное сопротивление столба дуги (Ом)

$$R_{ост} = M_0 n_a 10^6, \quad (3-39)$$

где M_0 — функция отключаемого тока (рис. 3-36, а).

Исключая из (3-38) время $t_{кр}$ и подставляя вместо $R_{ост}$ выражение (3-39), получаем уравнение, которое можно решить

относительно числа разрывов n_a , если пренебречь функциональным влиянием R_d^0 под знаком натурального логарифма в выражении для U_0 . В этом случае под знаком логарифма вместо U_0 войдет величина

$$U'_0 = 0,9K_{cx}U_{ном}\sqrt{1 - \cos \varphi}.$$

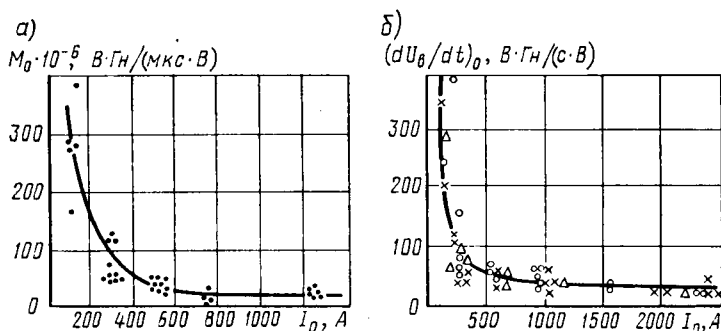


Рис. 3-36. Зависимости $M_0 = f(I_0)$ для свободной дуги и $(dU_B/dt)_0 = f(I_0)$ для щелевых камер

В результате математических преобразований получаем приближенную зависимость для определения числа разрывов при апериодическом процессе:

$$n_a \geq \frac{K_n U_{ном} - (\beta_k K_n L / M_0) [1 + \ln K_n U_{ном} M_0 / (\beta_k K_n L)]}{U_{вп}^0 + 0,34 K_n I_d^0 R_d^0 I_0}, \quad (3-40)$$

где $K_n = 0,9K_{cx}\sqrt{1 - \cos \varphi_0}$.

На основе неравенства (3-31) и выражения (3-39) можно получить следующее условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в апериодический:

$$f_0 \geq M_0 n_a 10^6 / (\pi L) = \omega n_a M_0 I_0 \cdot 10^6 / (\pi U_{ном} \sin \varphi). \quad (3-41)$$

При расчете числа разрывов на полюс аппарата сначала по (3-40) рассчитывается величина n_a для апериодического процесса. Затем проверяется условие (3-41). Если оно выполняется, то искомое число разрывов равно n_a . Если же это условие не выполняется, то по (3-37) определяется число разрывов n_k при колебательном процессе, которое и является искомым. В этих расчетах величины $U_{в.п}^0$ можно найти по кривым (3-24), K_n — по кривой (рис. 3-23), K_a — по формуле (3-32), β_k — по табл. 3-4, M_0 — по рис. 3-37, а удельное электрическое сопротивление R_d^0 — по эмпирической формуле (Ом см)

$$R_d^0 \approx 0,015 + 14200 / I_0^2. \quad (3-42)$$

Дугогасительная решетка. Для дугогасительной решетки обычно требуется определить количество пластин n , обеспечивающее успешное гашение дуги в заданных условиях отключения цепи.

Эмпирическая зависимость напряжения дуги от тока в дугогасительной решетке из стальных пластин имеет вид

$$U_d = U_d^0 \sqrt{n - 0,6}, \quad (3-43)$$

где $U_d^0 = (110 + 0,003I_0)(0,7 + 0,04\delta_n)$ — эмпирическая величина; δ_n — расстояние между пластинами, см.

Скорость движения дуги в решетке, найденная опытным путем при токах от 100 до 2400 А,

$$v_d \approx 1,73\delta_n^{2,1/3}. \quad (3-44)$$

Чтобы дуга при гашении не выходила за пределы дугогасительной решетки, ее пластины должны иметь необходимую длину (см):

$$l_n \geq 1,73\delta_n^{2,1/3} t_r. \quad (3-45)$$

На основе результатов экспериментальных исследований найдена эмпирическая формула для остаточного сопротивления дугового промежутка в решетке (минимум) (Ом):

$$R_{ост} \approx R_{0,0} \sqrt{n - 0,6}, \quad (3-46)$$

где $R_{0,0} = 1300 I_0^{-2/3}$ — эмпирическая величина.

В § 3-4 приведены некоторые зависимости восстанавливающейся прочности в решетке от ряда факторов. На основе этих, а также и других опытных данных найдены эмпирические формулы для определения восстанавливающейся прочности в дугогасительной решетке:

$$\left. \begin{aligned} U_{в.п} &= U_{в.п}^0 + K_n t; \\ U_{в.п} &= U_n^0 \sqrt{n - 0,6} \quad \text{и} \quad K_n = K_n^0 \sqrt{n - 0,6}; \\ K_n^0 &= [820 + \delta_n^2 (\sqrt{T_0} - 5,7)] \sqrt{\Delta} 10^6 / [2 \sqrt{T_0} (40 + \\ &+ \sqrt{T - 273})]; \\ U_n^0 &= 72 + 0,72\delta_n. \end{aligned} \right\} \quad (3-47)$$

Здесь δ_n — расстояние между пластинами решетки, мм; Δ — толщина пластин решетки, мм.

Для оценки средней установившейся температуры нагрева стальных пластин дугогасительной решетки можно использовать эмпирическую зависимость (К):

$$T \approx 293 + 0,018I_0 \sqrt{Z}, \quad (3-48)$$

где Z — число отключений цепи в час при отключаемом токе I_0 .

На основе неравенства (3-34) найдена формула для определения числа разрывов решетки при колебательном процессе восстановления напряжения:

$$n_k = 0,6 + [K_1 K_n U_{ном} / (K_n^0 + 2f_0 U_n^0 + 0,35 K_1 K_n U_d^0)]^2, \quad (3-49)$$

в которой $K_1 = 2f_0 K_a$ и $K_n = 0,9 K_{сх} \sqrt{1 - \cos \varphi_0}$.

Формула для определения числа разрывов решетки при аperiodическом процессе восстановления напряжения, найденная на основе условия гашения дуги (3-35), имеет вид

$$n_a = 0,6 + \frac{K_n U_{ном} - K_2 [1 + \ln (K_n U_{ном} / K_2)]}{U_{в.п}^0 + 0,35 K_n U_d^0}, \quad (3-50)$$

где $K_2 = LI_0^{2/3} K_p^0 / 1300$, если выразить L — в генри, I — в амперах, K_p^0 — в вольтах в микросекунду.

Представим условие (3-31) перехода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodический для дугогасительной решетки (с учетом (3-46))

$$\begin{aligned} f_0 &\leq (415 \sqrt{n_a - 0,6}) / (LI_0^{2/3}) = \\ &= (415 \omega I_0^{1/3} \sqrt{n_a - 0,6}) / (U_{ном} \sin \varphi). \end{aligned} \quad (3-51)$$

Справедливость приведенных зависимостей проверена при отключаемых токах от 100 до 3600 А. Они относятся к условиям беспрепятственного распространения дуги по пластинам решетки.

Щелевые камеры. Для этого вида камер найдем соотношение для расчета времени дуги, используя исходные зависимости (3-30) — (3-36).

На рычажных или мостиковых контактах длина дуги

$$l_d \approx \sqrt{\beta^2 + 9h^2} = \sqrt{\beta^2 + 9V_d^2 t^2}.$$

Для определения средней скорости движения дуги переменного тока в щелевой камере используется эмпирическая зависимость (см/с)

$$v_d = 5 \sqrt{I_0 (H - 0,08 I_0 / \delta)}. \quad (3-52)$$

Она справедлива при токах от 50 до 2400 А, средней напряженности внешнего поля магнитного дутья $H = 80 - 800$ А/см и ширине щели асбестоцементной камеры δ от 0,45 до 1,2 см. Экспериментальные исследования показывают, что эквивалентное сопротивление дуги переменного тока в щелевой камере без большой погрешности

$$R_{д.э} \approx E_d l_d, \quad (3-53)$$

где E_d вычисляется по эмпирическим формулам (3-24) и (3-25), если в них подставлять действующее значение отключаемого тока I_0 .

На рис. 3-36, б приведена опытная зависимость величины $(dU_{\text{в}}/dt)_0$ от тока I_0 для щелевых камер, которая позволяет оценить максимальную скорость восстановления напряжения $(dU_{\text{в}}/dt)_{\text{max}}$ при апериодическом процессе. Эти величины связаны соотношением

$$(dU_{\text{в}}/dt)_{\text{max}} = U_0 R_{\text{ост}}/L = (dU_{\text{в}}/dt)_0 U_0/L, \quad (3-54)$$

которое фактически учитывает влияние остаточного сопротивления дуги $R_{\text{ост}}$ в щелевых камерах на процесс восстановления напряжения.

Расчет времени гашения дуги целесообразно производить сначала по формулам для апериодического процесса, затем проверить условие перехода колебательного процесса в апериодический. Если это условие выполняется, значит полученные расчетные величины являются достоверными; если оно не выполняется, то расчет производят для колебательного процесса, считая полученные данные достоверными.

Условие гашения дуги при апериодическом процессе (3-35) с учетом формулы (3-19) для восстанавливающейся прочности принимает следующий вид:

$$U_{\text{в.п}}^0 + K_{\text{п}} t_{\text{кр}} 10^6 = U_0 [1 - \exp(-R_{\text{ост}} t_{\text{кр}}/L)];$$

$$K_{\text{п}} 10^6 = U_0 (R/L) \exp(-R_{\text{ост}} t/L). \quad (3-55)$$

Зависимость (3-36) для $\sin \varphi_x$ можно представить в виде

$$\sin \varphi_x = (\sin \varphi_0) / \sqrt{\sin^2 \varphi_0 + (\cos \varphi_0 + R_{\text{э.д}}/Z)^2}, \quad (3-56)$$

где φ_0 — угол сдвига фаз между током и напряжением при замкнутом состоянии контактов аппарата.

Учитывая, что полное сопротивление отключаемой цепи $Z_0 = U_{\text{ном}}/I_0$, а также, что эквивалентное сопротивление дуги выражается зависимостью (3-53) и длина дуги $l_{\text{д}}$ с основаниями на рычажных контактах $l_{\text{д}} \approx 3V_{\text{д}} t_{\text{г}}$, на основе (1-10) получим следующее выражение для U_0 :

$$U_0 = \frac{V \sqrt{2/3} K_{\text{сх}} U_{\text{ном}} \sin \varphi_0}{V \sin^2 \varphi_0 + (\cos \varphi_0 + 3E_{\text{д}} U_{\text{д}} t_{\text{г}}/U_{\text{ном}})^2}. \quad (3-57)$$

Используя выражения (3-54), (3-57), из (3-55) находим

$$U_{\text{в.п}}^0 + \frac{K_{\text{п}} L \cdot 10^6}{(dU_{\text{в}}/dt)_0} \ln \frac{U_0 (dU_{\text{в}}/dt)_0}{K_{\text{п}} L \cdot 10^6} = U_0 - \frac{K_{\text{п}} L \cdot 10^6}{(dU_{\text{в}}/dt)_0}.$$

Это уравнение нельзя решить относительно U_0 . В приближенном рассмотрении можно не учитывать влияние сопротивления дуги $R_{\text{д}}$ на величину U_0 , входящую под знак натурального логарифма, и принять $U'_0 \approx K_{\text{н.п}} U_{\text{ном}}$, где приближенно коэффициент $K_{\text{н.п}} = 0,9 K_{\text{сх}} \sin \varphi_0$.

В итоге получим:

$$U_0 = U_{в.п}^0 + A_0 [1 + \ln (K_{н.п} U_{ном}/A_0)];$$

здесь

$$A_0 = \frac{K_{п} L \cdot 10^6}{(dU_{в}/dt)_0} = \frac{K_{п} U_{ном} I_0 \cdot 10^6 \sin \varphi}{18000 \omega I_0} = \frac{55,6 K_{п} U_{ном} \sin \varphi_0}{\omega}.$$

Здесь $K_{п}$ — скорость роста прочности, В/мкс; L — индуктивность цепи, Гн; $U_{ном}$ — номинальное напряжение, В; φ_0 — начальный угол сдвига фаз между током и напряжением; ω — угловая скорость тока, рад/с.

Решив это уравнение с учетом (3-57), находим время горения дуги для апериодического процесса восстановления напряжения:

$$t_{г} \approx \frac{U_{ном}}{3E_d v_d} \sqrt{\frac{K_{н.п} U_{ном}^2}{\{U_{в.п}^0 + A_0 [1 + \ln (K_{н.п} U_{ном}/A_0)]\}} - \sin^2 \varphi_0} - \cos \varphi_0, \quad (3-58a)$$

где $K_{н.п} = (2/3) K_{сх} \sin \varphi_0$ ($K_{сх}$ — коэффициент схемы); $U_{в.п}^0$ — начальная прочность, В; E_d — градиент напряжения дуги, В/см; v_d — скорость дуги, см/с.

По (3-34) можно определить время горения дуги для колебательного процесса восстановления напряжения:

$$U_{в.п}^0 + K_{п} \cdot 10^6 / 2f_0 \geq K_a U_0.$$

В результате математических преобразований получим следующее выражение для времени горения дуги при колебательном характере восстановления напряжения:

$$t_{г} = (U_{ном} / 3E_d v_d) \times \\ \times \sqrt{\frac{2}{3} \left[\frac{K_{сх} K_a U_{ном} \sin \varphi_0}{U_{в.п}^0 + K_{п} \cdot 10^6 / 2f_0} \right]^2 - \sin^2 \varphi_0} - \cos \varphi_0. \quad (3-58b)$$

Начальная восстанавливающаяся прочность $U_{в.п}^0$ и скорость роста прочности в щелевых камерах $K_{п}$ определяются по кривым, изображенным на рис. 3-27. Исходя из зависимостей (3-31) и (3-54), находим условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в апериодический для щелевых камер:

$$f_0 \geq (dU_{в}/dt)_0 / \pi L; (dU_{в}/dt)_0 \approx 18000 I_0. \quad (3-59)$$

Время горения дуги $t_{г}$, рассчитываемое по формуле (3-58) или (3-59), определяется с того момента, когда в межконтактном промежутке создаются условия для нормального распространения дуги в камере. Для существующих конструкций контакторов и магнитных пускателей оно достигается через время

0,01 — 0,02 с. Таким образом, полное время горения дуги должно складываться из суммы указанного времени и времени, рассчитываемого по формуле (3-58) или (3-59), $t_{\Sigma} \approx (0,01 \div 0,02) + t_r$.

Размеры щелевой дугогасительной камеры определяются по длине дуги при найденном времени горения дуги.

Пример 1. Рассчитать число разрывов дугогасительного устройства со свободной дугой и дугогасительной решеткой, а также время горения дуги в щелевой камере при заданных условиях отключения цепи: номинальное напряжение $U_{ном} = 380$ В, отключаемый ток $I_0 = 600$ А, $\cos \varphi_0 = 0,35$, отключаемая цепь — трехфазная воздушная, частота источника $f = 50$ Гц, частота коммутационных операций $Z = 1200$ в час, скорость расхождения контактов $v_p = 75$ см/с.

Порядок расчета. Общие параметры

1. Собственная частота отключаемой сети рассчитывается по формуле (1-69) при $P_{ном}$ до 50 кВт. Для заданных условий

$$P_{ном} = \sqrt{3} U_{ном} I_0 \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 600 \cdot 0,35 = 144 \text{ кВт.}$$

По кривым (рис. 1-21) берем предельно возможную частоту $f_0 = 70$ кГц.

2. По формуле (3-32) для $f_0 = 70$ кГц находим коэффициент амплитуды: $K_a = 1 + \exp(-0,0003 f_0) = 1 + \exp(-0,0003 \cdot 70 \cdot 10^{-3}) \approx 1,0$.

3. Для трехфазной цепи коэффициент схемы $K_{сх} = 1,5$.

4. Индуктивность отключаемой цепи определяем по формулам (Гн)

$$X_0 = \omega L = Z_0 \sin \varphi_0 = (U_{ном}/I_0) \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0};$$

$$L = (U_{ном}/\omega I_0) \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = (380/314 \cdot 600) \sqrt{1 - 0,35^2} = 1,93 \cdot 10^{-3}.$$

5. Коэффициент $K_{н.п}$ из зависимости (3-40)

$$K_{н.п} = 0,9 K_{сх} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = 0,9 \cdot 1,5 \sqrt{1 - 0,35^2} = 1,1.$$

Дугогасительные устройства со свободной дугой в воздухе. 1. Число разрывов при аperiodическом характере восстановления напряжения определяется по формуле (3-40).

Для медных контактов по кривой (рис. 3-23) начальная восстанавливаемая прочность при токе 600 А $U_{в.п}^0 = 69$ В, а скорость роста прочности $K_{п} = 1,5$ В/мкс.

По табл. 3-4 для медных контактов коэффициент равен $\beta_k = 1,0$.

По графику (рис. 3-36, а) для тока 600 А значение $M_0 = 0,3 \cdot 10^{-4}$ В $\times$ Гн/(мкс $\cdot$ В).

Удельное эквивалентное сопротивление дуги по формуле (3-42):

$$R_d^0 = 0,015 + 14 \cdot 200/I_0^2 = 0,015 + 14 \cdot 200/600^2 = 0,054 \text{ Ом/см.}$$

Длина дуги на одном разрыве аппарата с пальцевыми контактами

$$l_d^0 = \sqrt{(v_p t_r)^2 + 9(v_d t_r)^2} = t_r \sqrt{v_p^2 + 9v_d^2}.$$

Принимаем скорость расхождения контактов $v_p = 75$ см/с, время гашения дуги меньше одного полупериода тока $t_r = 0,008$ с, чтобы было гарантировано гашение дуги при первом переходе тока через нулевое значение.

Скорость движения дуги для тока $I_0 = 600$ А по выражению (3-10)

$$v_d = 37 \sqrt[3]{I_0} = 37 \sqrt[3]{600} = 314 \text{ см/с.}$$

Тогда

$$l_d^0 = 0,008 \sqrt{75^2 + 9 \cdot 314^2} = 7,5 \text{ см.}$$

Число разрывов n_a при аperiodическом процессе восстановления напряжения по формуле (3-40)

$$\begin{aligned} n_a &\geq \frac{K_{н.п} U_{ном} - (\beta_K K_{пL} / M_0) [1 + \ln (K_{н.п} U_{ном} M_0 / \beta K_{пL})]}{U_{в.п}^0 + 0,34 K_{н.п} l_d^0 R_d^0 I_0} = \\ &= \frac{1,1 \cdot 380 - [1,0 \cdot 1,5 \cdot 0,00193 / (0,3 \cdot 10^{-4})] [1 + \ln (1,1 \cdot 380 \times \\ &\quad \rightarrow \frac{\times 0,3 \cdot 10^{-4}) / (1,0 \cdot 1,5 \cdot 0,00193)]}{69 + 0,34 \cdot 1,1 \times} \\ &\quad \rightarrow \frac{\times 7,5 \cdot 0,054 \cdot 600}{\times 7,5 \cdot 0,054 \cdot 600} = 1,15. \end{aligned}$$

В реальных конструкциях аппаратов число разрывов на полюс может быть равно лишь конечным значениям $n = 1, 2, 3$ и т. д. Поэтому при расчетном значении $n > 1$ надо брать число разрывов $n_a = 2$.

2. Проверяем по формуле (3-41) условия перехода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodический:

$$f_0 = 70\,000 \geq M_0 n_a 10^6 / (\pi L) = 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^6 / (3,14 \cdot 0,00193) = 9850 \text{ Гц.}$$

Условие выполняется. Следовательно, в рассматриваемом случае наблюдается аperiodический процесс восстановления напряжения и число разрывов на полюс аппарата должно быть принято равным $n = 2$.

3. Определяем по (3-37), каким было бы число разрывов при колебательном процессе восстановления напряжения:

$$\begin{aligned} n_K &\geq \frac{1,8 U_{ном}}{0,62 I_0 R^0 l_d + \frac{2 U_{в.п}^0 f_0 + \beta_K K_{пL} \cdot 10^6}{K_a K_{сх} f_0 \sqrt{1 - \cos \varphi_0}}} = \\ &= \frac{1,8 \cdot 380}{0,62 \cdot 600 \cdot 0,054 \cdot 7,5 + \frac{2 \cdot 69 \cdot 70\,000 + 1,0 \cdot 1,5 \cdot 10^6}{1,0 \cdot 1,5 \cdot 70\,000 \sqrt{1 - 0,35}}} = 2,53. \end{aligned}$$

Дуогасительная решетка. Принимаем расстояние между пластинами решетки $\delta = 4$ мм и толщину пластин $\Delta = 2$ мм.

1. Установившаяся температура нагрева пластин решетки по формуле (3-48):

$$T = 293 + 0,018 I_0 \sqrt{Z} = 293 + 0,018 \cdot 600 \sqrt{1200} = 667 \text{ К.}$$

2. По выражениям (3-43) и (3-47) находим

$$U_d^0 = (110 + 0,003 I_0)(0,7 + 0,04\delta) = (110 + 0,003 \cdot 600)(0,7 + 0,04 \cdot 4) = 96.$$

$$U_n^0 \approx 72 + 0,72\delta = 72 + 0,72 \cdot 4 = 75.$$

$$\begin{aligned} K_n^0 &= \frac{[820 + \beta_n^2 (\sqrt{I_0} - 5,7)] \sqrt{\Delta} \cdot 10^6}{2 \sqrt{I_0} (40 + \sqrt{T - 273})} = \\ &= \frac{[820 + 4^2 (\sqrt{600} - 5,7)] \sqrt{2} \cdot 10^6}{2 \sqrt{600} (40 + \sqrt{667 - 273})} = 0,59 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

3. Число разрывов n_a для аperiodического процесса восстановления напряжения по формуле (3-50)

$$K_2 = \frac{LI_0^{2/3} K_n^0}{1300} = \frac{0,00193 \cdot 600 \cdot 0,59 \cdot 10^6}{1300} = 62;$$

$$n_a \geq 0,6 + \left\{ \frac{K_{н.п} U_{ном} - K_2 [1 + \ln (K_{н.п} U_{ном} / K_2)]}{U_{в.п}^0 + 0,35 K_{н.п} U_d^0} \right\}^2 =$$

$$= 0,6 + \left\{ \frac{1,1 \cdot 380 - 62 [1 + \ln (1,1 \cdot 380 / 62)]}{75 + 0,35 \cdot 1,1 \cdot 96} \right\}^2 = 5,1.$$

4. По выражению (3-51) проверяем выполнение условия перехода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodический при $n_a = 6$:

$$f_0 = 70\,000 \geq \frac{415 \sqrt{n_a - 0,6}}{LI_0^{2/3}} = \frac{415 \sqrt{6 - 0,6}}{0,00193 \cdot 600^{2/3}} = 7000 \text{ Гц.}$$

Условие перехода выполняется. Следовательно, расчетное число разрывов дугогасительной решетки $n = 6$ ($n > 5,1$).

5. По формуле (3-49) проверяем, каким было бы число разрывов при колебательном процессе восстановления напряжения:

$$K_1 = 2f_0 K_a = 2 \cdot 70\,000 \cdot 1,0 = 140\,000,$$

$$n_k = 0,6 + \left(\frac{K_1 K_{н.п} U_{ном}}{K_p^0 + 2f_0 U_n^0 + 0,35 K_1 K_{н.п} U_d^0} \right)^2 =$$

$$= 0,6 + \left(\frac{140\,000 \cdot 1,1 \cdot 380}{0,59 \cdot 10^6 + 2 \cdot 70\,000 \cdot 75 + 0,35 \cdot 140\,000 \cdot 1,1 \cdot 96} \right)^2 = 13,8.$$

6. Необходимая длина пластин решетки по (3-45) при времени горения дуги $t_r = 0,02$ с

$$l_n = 1,73 \delta_n^2 \sqrt[3]{I_0} t_r = 1,73 \cdot 4^2 \cdot \sqrt[3]{600} \cdot 0,02 = 4,7 \text{ см.}$$

Щелевые дугогасительные камеры. Принимаем ширину щели в камере $\delta = 0,45$ см, число витков обмотки последовательного магнитного дутья $w = 2$, а расстояние между стальными полюсами системы магнитного дутья $\Delta = 8$ см (см. рис. 3-3, в).

1. Напряженность поля магнитного дутья (при отсутствии насыщения)

$$H = Iw/\Delta = 600 \cdot 2/8 = 150 \text{ А/см.}$$

Заметим, что более точный расчет H должен проводиться с учетом сопротивления стали магнитопровода при токах, близких к номинальному и выше его. Кроме того, следует учитывать, что в процессе отключения ток изменяется от начального I_0 до нуля и соответственно изменяется H .

2. Скорость движения дуги в камере по формуле (3-52)

$$v_d = 5 \sqrt{I_0 (H - 0,08 I_0 / \delta)} = 5 \sqrt{600 (150 - 0,08 \cdot 600 / 0,45)} = 815 \text{ см/с.}$$

3. По соотношению (3-13) находим диаметр дуги, чтобы определить, к какому типу отнести рассчитываемую камеру — с широкой или с узкой щелью:

$$d = 1,12 \sqrt{I_0 / (20 + v_d)} = 1,12 \sqrt{600 / (20 + 815)} = 0,95 \text{ см.}$$

Ширина щели рассчитываемой камеры $\delta = 0,45$ см меньше диаметра дуги d , поэтому камера относится к типу узкощелевых.

4. Градиент напряжения дуги в камере с узкой щелью по формуле (3-24)

$$E = \frac{92}{\sqrt{I_0}} + 0,312 \frac{\sqrt{I_0}}{\delta^{2/3}} + 7 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{v_d^2 I_0}{\delta^2}} = \frac{92}{\sqrt{600}} + 0,312 \frac{\sqrt{600}}{0,45^{2/3}} + 7 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{815^2 \cdot 600}{0,45^2}} = 17,7 \text{ В/см.}$$

5. Определяем по (3-58a) время дуги при апериодическом процессе восстановления напряжения:

$$U_{в.п}^0 = 70 \text{ В, } K_{п} = 1,2 \text{ В/мкс,}$$

$$A_0 = 55,6 K_{п} U_{ном} \sin \varphi_0 / \omega = 55,6 \cdot 1,2 \cdot 380 \sqrt{1 - 0,35^2} / 314 = 75,8,$$

$$t_r = \frac{U_{ном}}{3E v_d} \left\{ \sqrt[3]{\frac{K_{н.п} U_{ном}^2}{\left[U_{в.п}^0 + A_0 \left(1 + \ln \frac{K_{н.п} U_{ном}}{A_0} \right) \right]^2} - \sin^2 \varphi_0 - \cos \varphi_0} = \right. \\ \left. = \frac{380}{3 \cdot 17,7 \cdot 815} \left\{ \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 380^2}{\left[70 + 75,8 \left(1 + \ln \frac{1,1 \cdot 380}{75,8} \right) \right]^2} - 0,88 - 0,35} = 0,0073 \text{ с.} \right.$$

6. Проверяем по (3-59) условие апериодичности процесса восстановления напряжения:

$$f_0 = 70\,000 \geq 18\,000 / (I_0 \pi L) = 18\,000 / (600 \cdot 3,14 \cdot 0,00193) = 4960 \text{ Гц.}$$

Условие (3-59) выполняется. Следовательно, расчетное время $t_r = 0,0073 \text{ с}$ справедливо. При этом времени длина дуги в камере

$$l_d = t_r \sqrt{v_p^2 + 9v_d^2} = 0,0073 \sqrt{75^2 + 9 \cdot 815^2} = 17,8 \text{ см.}$$

Следовательно, минимально необходимая длина щелевой камеры в направлении стрелы вылета дуги:

$$h = l_d / \pi = 17,8 / 3,14 = 5,7 \text{ см.}$$

Как указывалось, фактическое время горения дуги $t_{\Sigma} \approx 0,01 + t_r = 0,0173 \text{ с}$. Поэтому фактическая длина камеры в направлении стрелы вылета дуги должна быть больше расчетной или на выходе из камеры необходимо устанавливать пламягасительную решетку, которая предотвращает выход дуги за пределы камеры.

Пример 2. Определить, погаснет ли при первом переходе тока через нулевое значение дуга переменного тока 80 А при напряжении сети 127 В, если она возникла на расходящихся в воздухе медных контактах аппарата. Собственная частота отключаемой сети $f_0 = 10^4 \text{ Гц}$, коэффициент амплитуды $K_a = 1,3$, $\sin \varphi = 0,8$, $K_{сх} = \sqrt{3}$.

По (1-10) возвращающееся напряжение $U_0 = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{3} \cdot 127 \cdot 0,8 = 144 \text{ В}$. Первый максимум восстанавливающегося напряжения $U_{\max} = K_a U_0 = 1,3 \cdot 144 = 187 \text{ В}$.

Он достигается в момент времени по (1-14):

$$t_{кр} = 1/(2f_0) = 1/(2 \cdot 10^4) = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

За это время восстанавливающаяся прочность (по 3-19) нарастает до величины $U_{в.п} = U_{в.п}^0 + K_{п} t_{кр} = 170 + 0,8 \cdot 50 = 210 \text{ В}$.

Прочность $U_{в.п} > U_{\max}$, поэтому дуга погаснет за первым нулевым значением тока.

Начальная прочность $U_{в.п}^0 = 170$ В и скорость роста прочности $K_n = 0,8$ В/мкс определены по рис. 3-23 для $I_0 = 80$ А.

§ 3-7. ЭРОЗИЯ И ДУГОВОЙ ИЗНОС КОНТАКТОВ

Эрозия контактов — это перенос материала с одного контакта на другой, *дуговой износ* — это их выгорание под воздействием электрической дуги.

Мостиковую эрозию контактов можно объяснить термоэлектрическими эффектами, приводящими к асимметрии расплавленного металлического мостика (рис. 3-39), что в конечном счете приводит к переносу материала с одного контакта на другой. *Эффект Томсона* состоит в переносе электронами тепловой энергии с одного контакта на другой. Эффект Пельтье связан с выделением теплоты в контактах из разных материалов при одном направлении тока и поглощении теплоты — при другом. Еще в 1838 г. Э. Х. Ленц демонстрировал опыт, при котором нанесенная на контакт капля воды при одном направлении тока испарялась, при другом — охлаждалась (до температуры замерзания).

В результате термоэлектрических эффектов максимум температуры приходится не на середину расплавленного мостика M (рис. 3-37, а), а смещен от нее на Δx в сторону переноса теплоты (рис. 3-37, б). При разрыве он нарушается по изотерме с температурой $T_{\max}$ (рис. 3-37, в) и на одном участке остается больше металла, чем на другом. Застывший металл при большом числе отключений образует неправильные формы контактов (рис. 3-37, г). Эффективные меры борьбы с эрозией состоят в создании симметричных тепловых режимов мостика, например, подбором соответствующих контактных пар (катод Pt — анод Ag, катод Pd — анод Au и др.).

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. Она выражается предельным для аппарата числом таких механических операций. Для контакторов и пускателей первая может достигать 10^6 срабатываний, вторая на порядок выше первой (10^7). Поэтому в течение срока службы аппарата его главные контакты могут заменяться до 10 раз и более.

Высокая износостойкость аппарата достигается при усложнении и удорожании их конструкции. Но практически аппараты с высокой коммутационной износостойкостью (1 млн. срабатыва-

ний) применяются редко. Примерно для половины выпускаемых аппаратов достаточна износостойкость в 10^3 – 10^4 срабатываний, а допустимая частота операций — около 10 в час (для аппаратов тяжелого режима работы она достигает 3600 1/ч).

При анализе тепловых явлений на контактах исходят из мощности, выделяемой в приэлектродных зонах дуги. Приэлектродное падение напряжения составляет $\sim (10\text{--}30)$ В. Из-за большой плотности тока у электродов (10^6 – 10^7 А/см²) эта мощность выделяется в сконцентрированном объеме. Высокая температура дуги (6000–20 000° С) определяет высокую интенсивность передачи энергии на контакты излучением, а также теплопроводностью благодаря высоким градиентам температуры на участке контакт — дуга.

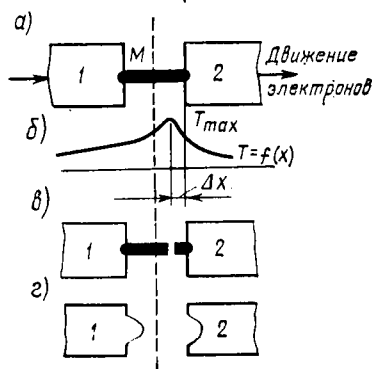


Рис. 3-37. Фазы мостиковой эрозии контактов

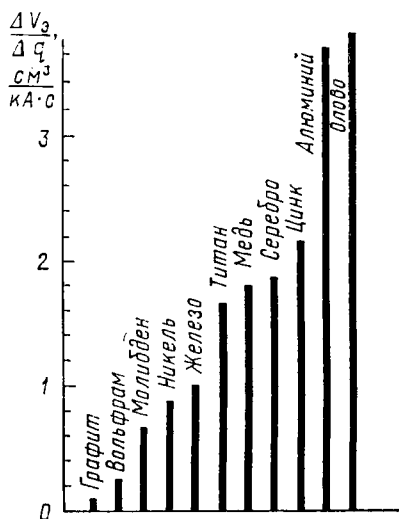


Рис. 3-38. Стопоставление удельного износа контактов из различных материалов

Энергия, сосредоточенная в небольших объемах, разогревает металл, плавит его и доводит до температуры кипения. Материал контактов выбрасывается в виде паров металла и капель (размеры капель — от 1 мкм до 2 мм, скорость полета — 5 м/с). Выброс паров металла и капель в окружающую среду вызывается образовавшимся давлением в месте взрыва (испарения) металла, электромагнитными силами пинч-эффекта, выделением газов из электродов, потоками газовой среды в дуговой зоне с присущими ей большими градиентами температуры и давления, движением расплавленных заряженных частиц, в электрическом поле и за счет сил тяжести.

Относительную дугостойкость различных металлов можно оценить на основании диаграммы (рис. 3-38). Она построена по результатам опытов с короткой дугой (0,8 мм) при токе 12 кА и продолжительности его протекания 0,0085 с. По оси ординат

отложено отношение объемного износа ΔV , к количеству электричества в килоампер-секундах, прошедшему через промежуток в форме газового разряда. На рис. 3-39 даны зависимости объемного износа катода и анода для различных контактных материалов от количества электричества в один полупериод горения дуги. Зависимости относятся к токам 1—10 кА и индукции поля магнитного дутья 0,02—0,1 Тл.

Установлено, что в износостойких металлокерамических материалах существует оптимальное процентное содержание отдельных компонентов, при котором износ минимален. На рис. 3-40 дана зависимость удельной объемной эрозии ΔV_0 , отнесенной к единице количества электричества (кА·с), от процентного содержания n тугоплавкого компонента в трех металлокерамических материалах (Cu—W, Ag—Mo, Ag—W).

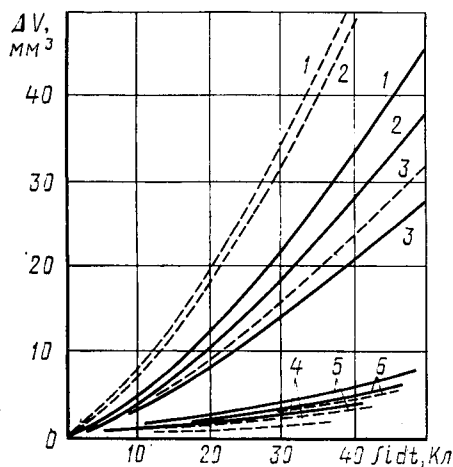


Рис. 3-39. Износ анода и катода в зависимости от интеграла тока:

— анод; катод
1 — Ag; 2 — Cu; 3 — Ag—Ni; 4 — Ag—CdO;
5 — Ag—CdO (мелкодисперсный); 6 — Ag—W

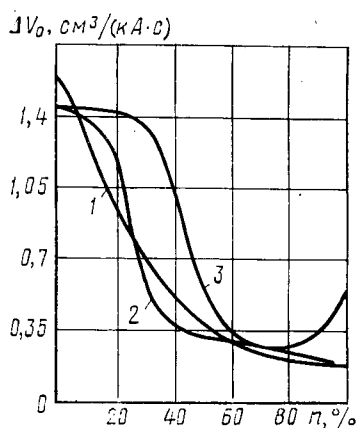


Рис. 3-40. Объемная эрозия металлокерамических материалов при разном процентном содержании тугоплавкой составляющей:

1 — Cu—W; 2 — Ag—Mo; 3 — Ag—W

Характерный вид имеет зависимость степени износа контактов отключающих аппаратов от напряженности внешнего поля магнитного дутья $H_{вн}$, изображенная на рис. 3-41 [13]. Минимальный износ наблюдается в области разных значений напряженности поля при разных токах. При больших токах минимум в кривой не наблюдается. Снижение износа при увеличении напряженности $H_{вн}$ в области малых ее значений вызвано улучшением условий гашения дуги, повышением скорости перемещения оснований дуги и переходом их на ненагретые участки контактов. Дальнейшее увеличение напряженности вызывает выбрасывание расплавленного металла из зоны контактов вместе с быстро перемещающейся дугой и ее основаниями. Эта зависимость существенно выражена

на контактах из однородных материалов и слабее на металлокерамических контактах.

Установлено, что на однородных материалах основания дуги на контактах быстро переходят на новые места, а на композиционных — удерживаются более значительное время. Видимо, пары металла от легкоплавкой составляющей оказывают стабилизирующее действие на основание дуги. Стабилизация оснований дуги тем больше, чем выше разница в температурах кипения компонентов и чем меньше их зерна. Высокая износостойкость металлокерамических материалов объясняется стабилизацией оснований горячей дуги, сохранением расплавленного металла в одном месте, а также отсутствием условий для его расплескивания, что справедливо лишь в определенной степени и относится к материалу с тугоплавким компонентом, имеющему волокнистое состояние. Другая важная причина высокой дугостойкости металлокерамики заключается в том, что в ней создаются условия для рассредоточения, деконцентрации тепловой энергии по поверхности контакта и объему, особенно в материалах с мелкозернистой структурой.

Одна из зависимостей для массового износа (г) контактов, справедливая в диапазоне токов от 10 до 400 А, имеет вид [16]:

$$Q = K_b N I_0^2 10^{-9}, \tag{3-60}$$

где N — число коммутаций тока; I_0 — величина тока, А; K_b — коэффициент, имеющий различные значения для различных материалов: Ag — CdO (15%) — (0,08 — 0,6); Cu — (0,8 — 6,0); Ag — (0,2 — 4,0).

Другая зависимость, отнесенная к объемному износу ΔV (мм³) на одно отключение цепи при токе I_0 (А) и времени дуги t (с), имеет вид

$$\Delta V = K_0 (6400 I_0)^n t. \tag{3-61}$$

Коэффициенты (для анода/катода) равны:

	K_0	n
Медь	26/8	1,25/1,75
Серебро	19/7	1,4/1,8
Никель	1,4/0,4	2,3/2,5
Композиция Ag—CdO	0,8/0,06	1,7/2,2
„ Ag—C	37/78	0,8/0,6
„ Ag—Ni	0,3/0,2	2,0/2,5
„ Ag—W	0,9/0,7	1,6/1,7

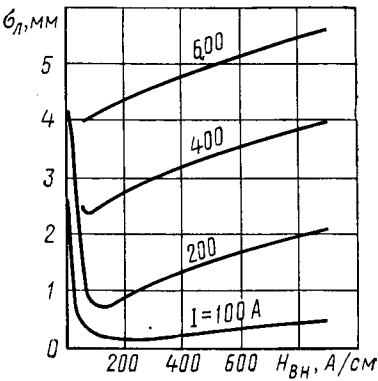


Рис. 3-41. Линейный износ контактов в зависимости от напряженности внешнего поля

При расчете дугового износа считают, что в основаниях дуги на контактах образуются микрованны расплавленного металла, испарение которого определяет дуговой износ. Задача сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности и определению средней температуры расплавленного очага металла на контакте. Условие решения задачи отражают изменения агрегатного состояния вещества (его переход из твердого в жидкое состояние) и наличие перемещающейся границы между жидкой и твердой фазами. Такая задача получила название *задача Стефана* по имени венского ученого, давшего аналитическое решение уравнения теплопроводности применительно к условиям промерзания полярных льдов [8].

Решение задачи теплопроводности по исследованию эрозии проводится при нелинейных краевых условиях, учитывающих условия на границах тел (граничные условия) и временные (начальные) условия. Нелинейность уравнения теплопроводности обуславливается зависимостями теплофизических параметров материалов (теплопроводность, теплоемкость, плотность) от температуры и переходами вещества из одного состояния в другое (фазовые переходы — из твердого в жидкое и из жидкого в парообразное состояние).

Общее нестационарное трехмерное уравнение теплопроводности является уравнением в частных производных, в котором зависимым переменным (функцией) является температура T , а независимыми переменными (аргументами) — время t и геометрические координаты x, y, z :

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P_n, \quad (3-61)$$

где γ — плотность; c — удельная теплоемкость; λ — теплопроводность вещества; P_n — мощность источника теплоты.

Левая часть уравнения определяет мощность, поглощаемую теплоемкостью, первые три члена правой части — мощность, передаваемую теплопроводностью, последний член правой части — мощность источника теплоты P_n (все члены относятся к единице объема). Граничные условия для решения (3-61) должны отражать: балансы тепловых потоков на границе твердой и жидкой и на границе жидкой и парообразной фаз, условие перемещения границ этих фаз, температуру в бесконечно удаленных точках. Начальное условие отражает температуру тела в начальный момент времени (до приложения источника теплоты).

Когда можно допустить, что изменение температуры происходит лишь в одном направлении, уравнение (3-61) принимает одномерный вид:

$$\gamma c \partial T / \partial t = \partial / \partial x (\lambda \partial T / \partial x) + P_n. \quad (3-62)$$

Его решение при определенных условиях [6]—[7] приводит к следующей формуле для массы выброшенного металла за одно отключение цепи:

$$m_0 = K_b \left(U'_9 \int_0^{t_a} |i| dt - W_{\text{исп}} \right) / (3cT_{\text{пл}}). \quad (3.63)$$

Здесь K_b — коэффициент выброса металла (отношение массы выброшенного металла к массе расплавленного); для воздуха при $q = \int_0^{t_a} |i| dt \geq 3 \div 8$ Кл коэффициент $K_b \approx 1$; при $q < 3$ Кл значение $K_b = 0 \div 0,7$; i — ток, А; t_r — время дуги, с; c — удельная теплоемкость, Дж/г; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления материала контакта, К; $W_{\text{исп}}$ — энергия на испарение металла, рассчитываемая по параметрам теплового потока, входящего в контакт, Дж; U'_9 — эквивалентное приэлектродное падение напряжения, В (медь — 18,5 В, вольфрам — 17,7 В).

Величина удельного износа, равная отношению общей массы износа к количеству электричества q , для серебра составляет 9—12, для меди 1,5—5,0, для вольфрама 2,4, для железа 3,9 мг/Кл.

Повышение давления паров металла в основании дуги создает поток этих паров и нагретых частиц газа. Так как через них проходит ток, то вследствие сжатия этой области магнитным полем тока (пинч-эффект) она преобразуется в струю. Возникают потоки разогретых паровых, газовых и ионизированных частиц в направлении от основания дуги в дуговой столб, называемые *потоками плазмы* (рис. 3-42, а). При токах в сотни ампер скорость

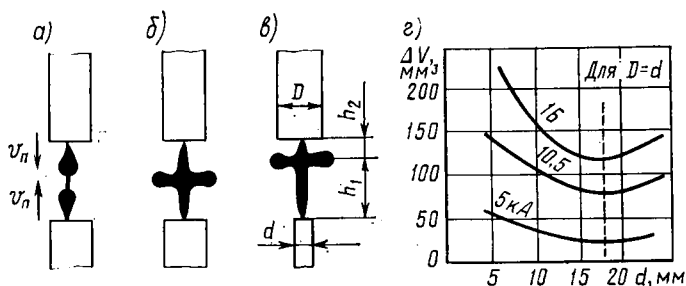


Рис. 3-42. Схема потоков плазмы и зависимости износа контактов от их диаметра

распространения v_n их фронта достигает десятков метров в секунду, а длина — десятков сантиметров. Соединившись в промежутке, эти потоки образуют облако плазмы (рис. 3-42, б), расположение которого зависит от соотношения диаметров D и d электродов (рис. 3-42, в).

Потоки плазмы влияют на износ контактов, с одной стороны, вследствие уноса ими частиц металла из электродов и, с другой стороны, вследствие выделения уносимой ими тепловой энергии на поверхности противоположного электрода. На рис. 3-42, *г* дана зависимость объемного износа ΔV верхнего контакта от диаметра нижнего. При равенстве диаметров верхнего и нижнего электродов ($d=D=18$ мм) износ бывает минимальным. Как установлено, в этом случае верхний и нижний потоки плазмы соединяются в середине промежутка ($h_1=h_2$ на рис. 3-42, *б*) и выделение их энергии на электродах минимально, так как в этом случае больше теплоты уносится в атмосферу. При $d/D < 1$ ($h_1/h_2 > 1$) больше изнашивается верхний контакт, при $h_1/h_2 < 1$ ($d/D > 1$) — нижний контакт, к которым соответственно приближается в этих случаях место соединения потоков, где сосредоточение тепловой энергии максимально. При этом возникает возможность регулирования степени износа контактов от потоков плазмы путем изменения соотношений их размеров, а также подбора разнородных материалов контактов.

Замыкание контактов при включении сопровождается их отскоками друг от друга, называемыми *вибрацией*. При вибрации контактов под током возникает электрическая дуга. Если включается двигатель, по контактам проходит пусковой ток, в пять — десять раз превышающий номинальный. Дуга при таком токе резко усиливает износ контактов. Допустимое время вибрации контактов в контакторах и пускателях не превышает 1—2 мс. Вибрация уменьшается при увеличении жесткости контактной пружины, снижении запаса кинетической энергии подвижных частей $W_k = J\omega^2/2$, где J — их момент инерции, а ω — угловая скорость.

Время вибрации контактов

$$t_v \approx (1,2 \div 1,3) \varepsilon m v / P_{\text{пр}}. \quad (3-64)$$

Здесь m — масса подвижного контакта, кг; v — скорость движения подвижного контакта к моменту удара, м/с; $P_{\text{пр}}$ — сила предварительного натяжения контактной пружины, Н; ε — коэффициент восстановления при ударе (рис. 3-43).

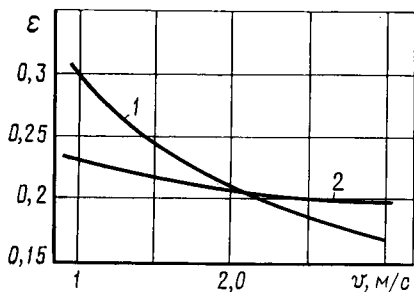


Рис. 3-43. Коэффициент восстановления медных 1 и серебряных 2 контактов в функции скорости в момент соударения

Отношение $m/P_{\text{пр}}$ желательно иметь возможно меньшим, например порядка 10^{-3} кг/Н. Тогда общее время вибрации контактов в реальных конструкциях контакторов определяется десятками долями миллисекунды. При больших превышениях момента, развиваемого движущими силами, над противодействующим момен-

том для уменьшения вибрации применяются гасители вибрации — резиновые, металлические пружинные, а в мощных контакторах — гидравлические и пневматические.

§ 3-8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД

Контакторы и пускатели общепромышленного применения снабжаются *электромагнитным приводом*. Механическая сила, развиваемая приводом, обеспечивает надежное включение контактора при напряжениях сети 0,85 от номинального. Тяговая характеристика находится на графике выше характеристики противодействующих сил (механическая характеристика). Типичные для контакторов тяговые и противодействующие характеристики показаны на рис. 3-44. Они приведены к рабочему воздушному зазору δ электромагнита. Зазор δ_n соответствует отпущенному, а зазор δ_0 — притянutoму состоянию якоря. Для контакторов с подвижной системой поворотного типа можно строить зависимости сил в функции угла поворота якоря.

Противодействующая характеристика $P_n = f(\delta)$ определяется в совокупности силой возвратной пружины и массой подвижной части (площадь S_1), силами пружин главных контактов (площадь S_2), силами пружин размыкаемых вспомогательных контактов (площадь S_3) и силами пружин замыкаемых вспомогательных контактов (площадь S_4). В момент касания главных контактов сила нажатия возрастает скачкообразно (участок 1—2) за счет предварительного натяжения пружин, благодаря чему уменьшается вибрация контактов и возможность их сваривания в процессе включения цепи. Это относится и к вспомогательным контактам — блок-контактам, коммутирующим цепи управления.

Статическая тяговая характеристика электромагнита, т. е. зависимость электромагнитной силы $P_{эм,ст}$ от зазора δ при номинальной магнитодвижущей силе $F_{ном} = I_{ном} W$ (кривая $b-a$), находится выше характеристики противодействующих сил $P_n = f(\delta)$. Динамическая тяговая характеристика, т. е. зависимость $P_{эм,д} = f(\delta)$ после подачи напряжения на обмотку электромагнита, когда ток в ней нарастает до установившегося значения $I_{ном}$, находится ниже статической (точки $\delta_n - a - b - в$). Для уверенного включения она также должна лежать выше характеристики $P_n = f(\delta)$. Поэтому желательно, чтобы при любых зазорах разность сил $P_{эм} - P_n$ была достаточно большой. Это необходимо и для обеспечения надежного включения электромагнита при пониженном напряжении.

Заметим, что чем больше интервал между тяговой и противодействующей характеристиками, тем меньше коэффициент возврата K_v , равный отношению тока отпускания электромагнита к току срабатывания. В контакторах обычно $K_v = 0,3 \div 0,6$. Но площадь, ограниченная кривыми P_d и P_n (при грубой оценке рассматривают кривые $P_{эм,д}$ и P_n), определяет избыток кинетической энергии подвижной системы контактора, который расхо-

дуются на удары деталей, вибрацию контактов и т. п. Эти факторы понижают износостойкость контактора. Поэтому существует оптимальное соотношение между характеристиками $P_{эм.д} = f(\delta)$ и $P_{п} = f(\delta)$ контактора. Исходя из опыта проектирования и эксплуатации, установлен коэффициент запаса K_3 , представляющий собой отношение сил $P_{эм}/P_{п}$. При критическом зазоре $\delta_{кр}$ коэффициент запаса для реле управления равен $K_3 = 1,5 \div 2,0$, для удерживающих электромагнитов $K_3 = 1,1 \div 1,2$, для контакторов и магнитных пускателей $K_3 = 1,2 \div 1,5$.

Для контакторов и магнитных пускателей критическим считается зазор $\delta_{кр}$, соответствующий моменту касания главных контактов. К этому зазору относится сила $P_{эм}$, соответствующая точке 3, и $P_{п}$, соответствующая точке 2 на рис. 3-44.

Противодействующая характеристика контактора может быть крутой или пологой. В зависимости от вида противодействующей характеристики подбирается тип электромагнита так, чтобы запас электромагнитной силы над противодействующей при всех значениях рабочего воздушного зазора был достаточным. Нерационален выбор электромагнита, при котором одним зазорам соответствует чрезмерно большой запас электромагнитной силы по сравнению с противодействующей, а другим — недопустимо малый запас.

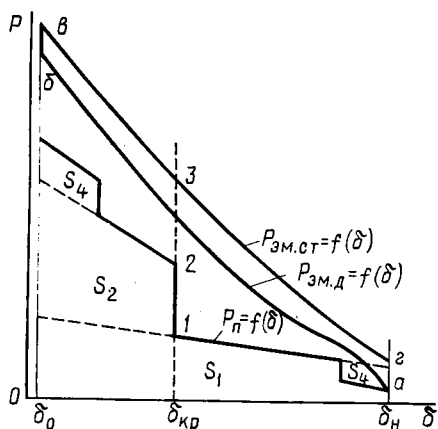


Рис. 3-44. Характеристики электромагнитного привода

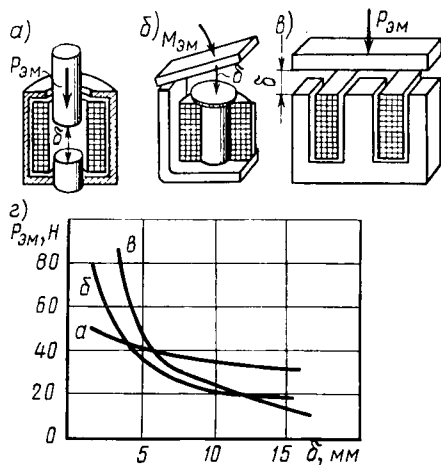


Рис. 3-45. Типичные тяговые характеристики электромагнитных приводов

В контакторах и пускателях наиболее распространены изображенные на рис. 3-45 виды электромагнитных приводов: броневой (а), клапанный (б) и Ш-образный (в). На рис. 3-45, г для примерно идентичных параметров этих электромагнитов изображены типичные для них тяговые характеристики — зависимости электро-

магнитной силы $P_{эм}$ от рабочего воздушного зазора δ . В зависимости от вида характеристики противодействующих сил (крутая или пологая) выбирается и тип электромагнита с соответствующей характеристикой. В области больших зазоров максимальные силы развивает броневой (соленоидный) электромагнит (кривая a), а наиболее крутую характеристику имеет электромагнит клапанного (кривая b) и Ш-образного типа (кривая $в$). Броневой и клапанный электромагниты применяются преимущественно на постоянном, Ш-образный — на переменном токе.

При расчете электромагнитов и их тепловых режимов надо учитывать то, что теплопередача от обмотки происходит не только через наружную, но и через внутреннюю ее поверхность, находящуюся в тепловом контакте со сталью магнитопровода. Если допустить, что температуры внутренней $S_{вн}$ и наружной $S_{нар}$ поверхностей обмотки одинаковы и равны T и что одинаковы и равны температуры окружающей среды $T_{окр}$ у этих поверхностей, то суммарная мощность, отводимая от этих поверхностей,

$$P_{\Sigma} = K_{т.нар} S_{нар} (T - T_{окр}) + K_{т.вн} S_{вн} (T - T_{окр}),$$

где $K_{т.нар}$, $K_{т.вн}$ — коэффициенты теплопередачи от наружной и внутренней поверхностей обмотки.

Это выражение можно представить в виде

$$P_{\Sigma} = K_{т.нар} (S_{нар} + K_{т.вн} S_{вн} / K_{т.нар}) (T - T_{окр}).$$

Таким образом, эквивалентная поверхность теплопередачи, отнесенная к коэффициенту теплопередачи с наружной поверхностью,

$$S_{эkv} = S_{нар} + (K_{т.вн} / K_{т.нар}) S_{вн}. \quad (3-65)$$

Применительно к допущенным условиям и полученной для них зависимости (3-65) экспериментально определено отношение, которое равно: для бескаркасных обмоток — 0,9, для обмоток, намотанных на изолированную металлическую гильзу, — 1,7, для обмоток, намотанных на изолированный каркас, — 2,4.

В электромагнитах переменного тока вследствие потерь на гистерезис и вихревые токи шихтованный стальной сердечник является дополнительным источником тепловых потерь. Повышение индукции в магнитопроводе, как известно, приводит к росту потерь. Поэтому величина допустимой индукции должна снижаться с ухудшением условий теплопередачи от внутренних зон магнитопровода. Условия теплопередачи от этих зон ухудшаются, например, при увеличении поперечного сечения $S_{ст}$ стали магнитопровода. Поэтому с ростом величины $S_{ст}$ допустимая индукция B в стали должна быть снижена. На рис. 3-46 даны зависимости индукции в замкнутой магнитной системе от площади сечения $S_{ст}$ магнитопровода для трех марок стали.

При практических расчетах числа витков обмоток электромагнитных приводов переменного тока иногда исходят из удельного

напряжения (в вольтах), приходящихся на один виток. Это напряжение зависит от сечения магнитопровода $S_{ст}$ и имеет следующие ориентировочные значения:

$S_{ст}, \text{см}^2$	2,5	5	7,5	10	15
$U_{уд}, \text{В/вит}$	0,7	0,14	0,2	0,245	0,3

В зависимости от номинального напряжения $U_{ном}$ обмотка электромагнита того или иного пускателя или контактора имеет разное число витков w , диаметр провода d и активное сопротивление R . Для примера в пускателе переменного тока на номинальный ток 200 А они таковы:

$U_{ном} = 127 \text{ В}$	$W = 400$	$d = 1,16 \text{ мм}$	$R = 1,96 \text{ Ом}$
220	700	0,86	6,6
380	1200	0,64	19,4
500	1580	0,59	29,8

В контакторе постоянного тока с клапанным электромагнитом соответствующие значения равны:

$U_{ном}, \text{В}$	W	$d, \text{мм}$	$R, \text{Ом}$
110	10 000	0,23	476
220	20 000	0,17	1800
440	38 000	0,12	6850

Приведенные данные по w , d и R относятся к конкретным сериям аппаратов; по ним можно судить о степени влияния номинального напряжения на w , d и R обмоток и порядке их величин при постоянном и переменном токе.

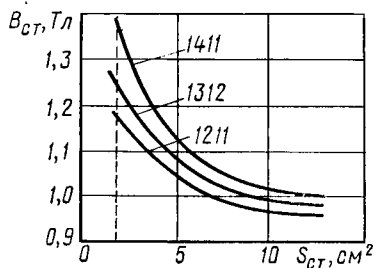


Рис. 3-46. Допустимая индукция в стали в зависимости от площади сечения магнитопровода

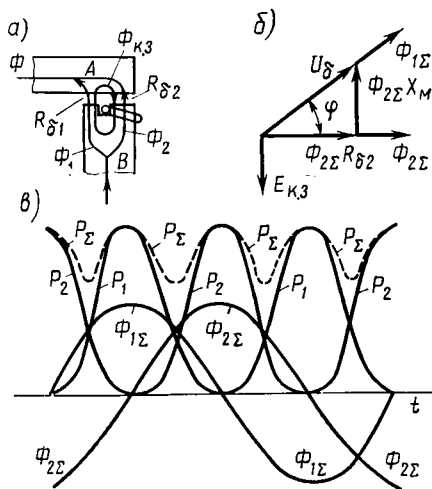


Рис. 3-47. Короткозамкнутый виток на полюсе а, векторная диаграмма б и кривые изменения в потоков и сил

Для устранения механических вибраций якоря в электромагнитах переменного тока применяются короткозамкнутые витки на полюсах (рис. 3-47, *а*). Условно обозначены потоки Φ_1 и Φ_2 от основной обмотки, а также $\Phi_{к.з}$ — от короткозамкнутого витка, которые в совокупности создают результирующие потоки $\Phi_{1\Sigma}$ и $\Phi_{2\Sigma}$ в левом и правом зазорах. В результате обеспечивается угол сдвига фаз φ между суммарными потоками $\Phi_{1\Sigma}$ и $\Phi_{2\Sigma}$, проходящими через неохваченную и охваченную короткозамкнутым витком части полюса. На участке $A-B$ в охваченной части имеются активное магнитное $R_{\delta 2}$ и реактивное магнитное X_M сопротивления. Последнее определяется активным сопротивлением короткозамкнутого витка $R_{к.з}$ ($X_M = \omega/R_{к.з}$, где ω — угловая скорость). Сопротивление $R_{\delta 2} = \delta/\mu_0 S_2$, где δ — воздушный зазор; S_2 — площадь охваченной витком части полюса.

Геометрическая сумма падения магнитного напряжения $\Phi_{2\Sigma} R_{\delta 2}$ и $\Phi_{2\Sigma} X_M$ позволяет найти вектор магнитного напряжения U_δ между точками A и B . В неохваченной части существует лишь активное сопротивление $R_{\delta 1}$, поэтому вектор потока $\Phi_{1\Sigma}$ совпадает с вектором U_δ . Следовательно, между потоком $\Phi_{1\Sigma}$ и $\Phi_{2\Sigma}$ существует угол сдвига фаз φ (рис. 3-47, *б*). Графики изменения во времени электромагнитных сил P_1 и P_2 , создаваемых потоками $\Phi_{1\Sigma}$ и $\Phi_{2\Sigma}$, даны на рис. 3-47, *в*. Суммарная сила $P_\Sigma = P_1 + P_2$ никогда не падает до нуля, и, если минимальное значение этой силы больше противодействующих сил в аппарате, то вибрация якоря электромагнита устраняется.

Оптимальные условия, когда минимальная электромагнитная сила притяжения якоря к полюсу имеет наиболее высокое значение, достигаются при равенстве модулей потоков $\Phi_{1\Sigma}$ и $\Phi_{2\Sigma}$, и угле φ между ними, равном 90° . При определенной величине тока $i_{к.з}$ в короткозамкнутом витке магнитный поток $\Phi_{к.з}$ определяется магнитным сопротивлением воздушного зазора δ : чем меньше зазор δ , тем больше поток $\Phi_{к.з}$. Следовательно, оптимальные условия с точки зрения устранения вибраций якоря создаются в совокупности соотношений площадей S_1 и S_2 полюса, электрическим сопротивлением короткозамкнутого витка, величиной воздушного зазора δ . Участки полюсов, через которые проходит поток $\Phi_{к.з}$, могут насыщаться и их сопротивление может повлиять на величину $\Phi_{к.з}$.

Когда напряжение на обмотке электромагнита переменного тока имеет постоянное действующее значение и можно пренебречь насыщением стали на участках полюсов, оптимальное соотношение между площадью $S_2 = S_{охв}$ и общей площадью полюса находится в пределах:

$$S_{охв}/S_\Sigma = 0,85 - 0,95. \quad (3-66)$$

Отметим, что конструктивно трудно выполнить виток с такой площадью охвата полюса. Практически указанное отношение обычно не превышает 0,8. Другое оптимальное соотношение:

$$R\delta/(\omega\mu_0 S_\Sigma) = 0,2 - 0,4. \quad (3-67)$$

Здесь R — электрическое сопротивление витка, Ом; δ — длина воздушного зазора между полюсами, см (обычно $\delta = 0,004 \div 0,005$ см); ω — угловая скорость тока, рад/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ — магнитная проницаемость вакуума, Гн/см.

Ток в обмотке электромагнита переменного тока зависит от величины воздушного зазора, так как от нее зависит индуктивное электрическое сопротивление обмотки электромагнита: $X = \omega L = 2\pi f \omega^2 G_m$, где f — частота тока, Гц; ω — число витков; G_m — магнитная проводимость электромагнита, Гн.

В простейшем случае без учета сопротивления стали и рассеяния $G_m = G_\delta = \mu_0 S / \delta$, где G_δ — проводимость воздушного зазора; $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ — проницаемость воздуха, Гн/м; S — площадь полюса; δ — рабочий зазор.

Ток в обмотке при напряжении $U_{\sim}$:

$$I_{\sim} = U_{\sim} / X = U_{\sim} / (2\pi f \omega^2 \mu_0 S / \delta). \quad (3-68)$$

Следовательно, с увеличением зазора δ ток в обмотке электромагнита переменного тока возрастает. Поэтому пусковой ток (максимальный δ) в несколько раз выше тока в притянутом состоянии якоря (минимальный δ).

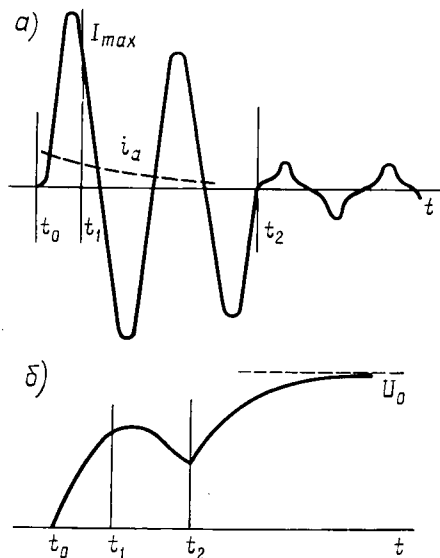


Рис. 3-48. Кривые изменения тока при включении электромагнита переменного (а) и постоянного тока (б)

На рис. 3-48 даны кривые изменения тока во времени при включении электромагнитного привода переменного и постоянного тока. При переменном токе (а) с момента включения t_0 ток нарастает до максимальной величины I_{max} из-за малого индуктивного сопротивления X при большом зазоре δ , а также из-за наличия апериодической слагающей i_a в токе включения. В момент t_1 якорь начинает двигаться, до момента t_2 воздушный зазор δ уменьшается, в соответствии с (3-68) ток снижается. В момент t_2 якорь останавливается, зазор δ становится очень малым, ток резко падает.

Видоизменение кривой тока за моментом t_2 происходит из-за насыщения стали магнитопровода. При малых мгновенных значениях тока в начале и в конце полупериода и определяемой ими малой напряженности магнитного поля имеется высокая магнит-

ная проницаемость материала и большое индуктивное сопротивление обмотки ($X = \omega L = \omega \omega^2 G_m = \omega \omega^2 \mu S / l$). При больших токах в середине полупериода наступает насыщение стали, магнитная проницаемость μ и индуктивное сопротивление X резко снижаются. При действующем синусоидальном напряжении это приводит к непропорционально большому росту тока в середине полупериода в сравнении с его значениями в начале и в конце полупериода, т. е. к появлению третьей гармонической в кривой тока. Увеличение тока в период включения электромагнита приводит к повышенному нагреву обмотки при частых включениях.

При постоянном токе (рис. 3-48, б) после включения обмотки под напряжением U_0 ток изменяется во времени соответственно уравнению баланса напряжений при неизменной индуктивности L обмотки:

$$U_0 = iR + d\Psi/dt = iR + (d/dt)(Li) = iR + L di/dt, \quad (3-69)$$

где Ψ — потокосцепление обмотки; R — ее активное сопротивление.

В момент t_1 электромагнитная сила больше противодействующей и якорь начинает двигаться. Движение якоря — это изменение воздушного зазора δ в электромагните и индуктивности его обмотки: $L = \omega^2 G_m = \omega^2 \mu_0 S / \delta$.

Уравнение баланса напряжений при изменяющейся индуктивности имеет другой вид:

$$U_0 = iR + L di/dt + idL/dt. \quad (3-70)$$

Появление третьего члена в (3-70) в сравнении с (3-69) можно уподобить снижению действующего в цепи напряжения источника ($U_0 - idL/dt$) или появлению второй составляющей переходного сопротивления в цепи, что вызывает уменьшение тока на участке движения якоря $t_1 - t_2$ в сравнении с условиями на участке $t_0 - t_1$, когда индуктивность обмотки постоянна и небольшая по величине. После остановки якоря в момент t_2 ток нарастает до I_0 по экспоненциальному закону, но уже с более высоким значением постоянной времени $\tau_0 = L/R$.

§ 3-9. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АППАРАТЫ

Токи высокой частоты используются при индукционном нагреве металла, в электроприводе с высокооборотными машинами, в электрифицированном инструменте и т. п. Благодаря току высокой частоты снижаются габариты и масса электрооборудования, повышаются скорость и быстродействие исполнительных механизмов. Для коммутации высокочастотных цепей потребовалось создание новых типов электрических аппаратов, особенности которых определяются условиями их работы в высокочастотных сетях.

Диапазон изменения частоты переменного тока в промышленных установках достаточно широк — от 50 до 10 000 Гц. *Электрические аппараты условно подразделяют на аппараты промышленной частоты (100—1200 Гц) и аппараты высокой частоты (до 10 000 Гц).* Номинальное напряжение аппаратов промышленной частоты обычно не превышает 660 В, а напряжение аппаратов высокой частоты достигает 1500 В.

Чем выше частота тока, тем сильнее проявляются *поверхностный эффект* и *эффект близости* в токоведущих частях и повышается их эквивалентное электрическое сопротивление. Так, у круглого медного проводника радиусом 11 мм при частоте тока 400 Гц вследствие этих факторов сопротивление увеличивается примерно вдвое в сравнении с сопротивлением постоянному току. Проводники прямоугольного сечения используются наиболее эффективно, если толщина шины $2a$ (см) меньше глубины проникновения тока b (см), т. е. когда $2a < b = \sqrt{\rho/\pi f \mu}$, где ρ — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·см; f — частота переменного тока, Гц; μ — магнитная проницаемость материала, Гн/см.

При поверхностном эффекте плотность тока в наружных слоях проводника выше, чем во внутренних. Эффект близости при токах разного направления приводит к повышению плотности тока в обращенных друг к другу частях проводников. При одинаковом направлении токов они вытесняются в наружные слои проводников.

При повышенной частоте оказывается возможным конструировать электрические аппараты без применения искусственного охлаждения токоведущих частей. Но при высокой частоте сопротивление токоведущих частей вследствие поверхностного эффекта сильно возрастает и аппараты на относительно небольшие номинальные токи в условиях естественного охлаждения приобретают значительные размеры. Для уменьшения размеров токоведущих частей (и аппарата в целом) находит применение водяное охлаждение. Для этого токоведущие части изготовляют полыми и по ним циркулирует вода. Существенный недостаток воды — ее относительно невысокое (в сравнении с диэлектриками) удельное электрическое сопротивление — порядка 10^4 Ом·см (городская водопроводная сеть). Однако с помощью фильтрования удельное сопротивление воды можно повысить до 10^6 Ом·см.

Коэффициент теплопередачи, представляющий собой тепловую мощность, снимаемую с единицы поверхности при разности температур в один градус, в условиях водяного охлаждения токоведущих частей

$$K_T = 430 \cdot 10^{-4} v^{0,8} d^{-0,22} (22 + T_B)^{0,4}. \quad (3-71)$$

Здесь K_T — коэффициент теплопередачи, Вт/(см² · град); v — скорость движения воды, м/с; d — диаметр канала, мм; T_B — температура воды, °С.

Разница значений номинального тока нагрузки и тока короткого замыкания в высокочастотных цепях обычно менее существенна, чем в цепях промышленной частоты. Индуктивности L проводов, машин, трансформаторов при высокой частоте f обуславливают относительно большие индуктивные сопротивления $x=2\pi fL$. Эти сопротивления сильно ограничивают ток короткого замыкания, который нередко оказывается соизмеримым с номинальным током нагрузки.

Однако если рассматривать две чисто индуктивные цепи — частотой 50 Гц и высокочастотную, имеющие одинаковые значения тока и напряжения, т. е. одинаковое значение индуктивного сопротивления, то можно сделать вывод, что в этих условиях с ростом частоты тока индуктивность L должна уменьшаться. Но индуктивность влияет на собственную частоту цепи f_0 (1-13). Можно легко убедиться в том, что в заданных условиях ($U = \text{const}$ и $I = \text{const}$) с повышением частоты источника тока должна увеличиваться и собственная частота цепи f_0 . Это, в свою очередь, приводит к ухудшению условий гашения электрической дуги.

В проводниках высокой частоты вследствие возникновения явлений вытеснения тока может наблюдаться смещение электрических осей. Если взять, например, проводник круглого сечения, то при равномерном распределении плотности тока по сечению электрическая ось пройдет через центр круга. При вычислении силы электродинамического взаимодействия между двумя проводниками круглого сечения в этом случае в расчете учитывается расстояние между осями, проходящими через центры сечений проводов, т. е. через центры круга. Если же по двум таким проводникам проходит ток высокой частоты, то вследствие эффекта близости перераспределяются плотности токов по сечению проводников. Если направление токов в проводниках противоположное, то благодаря эффекту близости плотности токов повышаются в тех частях проводников, которые обращены друг к другу. В наружных частях проводников, наоборот, плотности тока уменьшаются. Следовательно, в этих условиях электрические оси в проводниках смещаются в направлении к частям, обращенным друг к другу, т. е. расстояние между осями уменьшается. Это приводит к увеличению сил электродинамического взаимодействия между проводниками с током высокой частоты.

Прохождение тока высокой частоты обуславливает некоторые особенности режима работы контактов. Вследствие проявления поверхностного эффекта в области стягивания линий тока переходное сопротивление контактов возрастает. Это влияние можно учесть путем введения *коэффициента добавочных потерь* $K_{д.п}$ в формулу для переходного сопротивления $R_k = K_{д.п} R_{к.о.}$, где $R_{к.о.}$ — переходное сопротивление контактов при постоянном токе. Коэффициент добавочных потерь зависит от частоты тока, размеров площади касания в контакте и токоведущих частей, а также удельной электропроводности материала контакта. Практически

величина $K_{д.п}$ больше единицы при частотах выше нескольких сотен герц.

На рис. 3-49 даны зависимости $K_{д.п}$ от частоты для серебряных и медных контактов при разных силах контактного нажатия P_K (контактное нажатие определяет величину площадки смятия в месте касания контактов) и разных радиусах r_K контактных стержней. Высокая частота тока, например $f=10$ кГц, может оказаться соизмеримой с собственной частотой сети f_0 . Рассмотрим особенности процессов восстановления напряжения на контактах высокочастотного аппарата, если $f=f_0$.

При отключении цепи с чисто активной нагрузкой в момент перехода тока через нулевое значение напряжения источника тока также равно нулю. За переходом тока через нулевое значение напряжения на контактах восстанавливается со скоростью, равной

$$dU_B/dt = d/dt (\sqrt{2} U_{ном} \sin \omega t) = \sqrt{2} \omega U_{ном} \cos \omega t, \quad (3-72)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети, В.

Максимальная скорость восстановления напряжения создается в момент перехода тока через нулевое значение ($t=0$):

$$(dU_B/dt)_{max} = \sqrt{2} \omega U_{ном} = 2\sqrt{2} \pi f U_{ном}. \quad (3-73)$$

Из этих зависимостей видно, что с увеличением частоты тока условия отключения цепи с активной нагрузкой ухудшаются, так как скорость восстановления напряжения возрастает пропорционально этой частоте. Максимальное значение восстанавливающегося напряжения в этих условиях не зависит от частоты и равно $\sqrt{2} U_{ном}$.

Рассмотрим зависимости, относящиеся к процессу восстановления напряжения в цепи с преобладанием индуктивной нагрузки (рис. 3-50, а). Этот процесс описывается дифференциальным уравнением

$$iR + L di/dt + (1/C) \int i dt = \sqrt{2} U_{ном} \sin (\omega t + \varphi_0).$$

Если от тока i в переходном режиме перейти к восстанавливаемому напряжению U_B , то это уравнение примет вид

$$LC d^2 U_B/dt^2 + RC dU_B/dt + U_B = \sqrt{2} U_{ном} \sin (\omega t + \varphi_0). \quad (3-74)$$

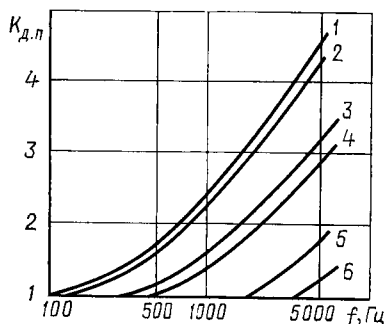


Рис. 3-49. Коэффициент добавочных потерь в контактах:

1, 4, 5 — Ag; 2, 3, 6 — Cu;
1, 2 — $r_K=12,5$, $P_K=490$; 3, 4 — $r_K=10$,
 $P_K=155$; 5, 6 — $r_K=5$ мм, $P_K=22$ Н

В этих уравнениях φ_0 — угол сдвига фаз между током и напряжением отключаемой цепи (при замкнутом состоянии контактов аппарата).

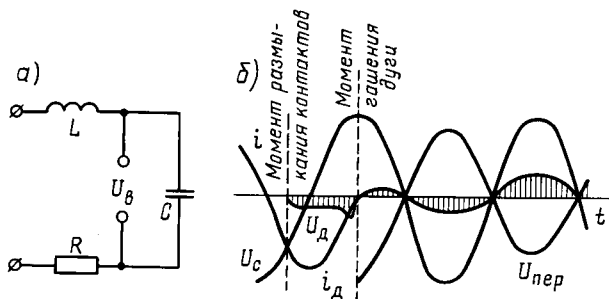


Рис. 3-50. Восстанавливающееся напряжение при высокой частоте источника

Решение уравнения (3-74) состоит из суммы двух слагающих — напряжений в установившемся и в переходном режимах. Полагая равным нулю напряжение U_B в момент перехода тока через нулевое значение ($t=0$), при определенных допущениях можно найти решение этого уравнения:

$$U_B = \sqrt{2} U_{ном} [\sin(\omega t + \varphi_0) - \cos \omega_0 t \exp(-t/\tau_3)].$$

Если принять $\varphi_0 = \pi/2$ и учесть, что $\sin(\omega t + \pi/2) = \cos \omega t$, то

$$U_B = \sqrt{2} U_{ном} [\cos \omega t - \cos \omega_0 t \exp(-t/\tau_3)];$$

$$\tau_3 = L/2R \text{ и } \omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (3-75)$$

Если частота тока значительно меньше собственной частоты цепи ($f \ll f_0$ и $\omega \ll \omega_0$), то в пределах малых величин времени t можно считать $\cos \omega t = 1$ по сравнению с величиной второго слагающего в формуле (3-75). Тогда

$$U_B = \sqrt{2} U_{ном} [1 - \cos \omega_0 t \exp(-t/\tau_3)]. \quad (3-76)$$

Пренебрегая затуханием [$\exp(-t/\tau_3) \approx 1$], из этого выражения можно найти, что амплитудное значение восстанавливающегося напряжения $U_{в\max} = 2\sqrt{2} U_{ном}$, а средняя скорость восстановления напряжения $(dU_B/dt)_{ср} = 4\sqrt{2} f_0 U_{ном}$.

Таким образом, при отключении индуктивной цепи с током промышленной частоты амплитудное значение восстанавливающегося напряжения $U_{в\max}$ возрастает вдвое по сравнению с условиями отключения цепи, имеющей чисто активную нагрузку. Скорость восстановления напряжения увеличивается пропорционально собственной частоте f_0 . Следовательно, при частоте

50 Гц условия отключения цепи, содержащей индуктивную нагрузку, оказываются значительно сложнее по сравнению с условиями отключения цепи, содержащей активное сопротивление.

Проанализируем характеристики процесса восстановления напряжения в индуктивной цепи при высокой частоте тока источника. В общем случае из формулы (3-75) следует, что при соизмеримых частотах тока f и цепи f_0 в кривой восстанавливающегося напряжения выражены биения. При равенстве частот $\omega = \omega_0$ и $f = f_0$ из (3-75) находим, что в случае отсутствия затухания $[\exp(-t/\tau_0) = 1]$ восстанавливающееся напряжение U_v равно нулю. С учетом затухания кривая U_v , рассчитанная по формуле (3-75), имеет вид, представленный на рис. 3-50, б. В рассматриваемых условиях напряжение на межконтактном промежутке восстанавливается очень медленно и его амплитудное значение не может превысить значения $\sqrt{2}U_{ном}$. Однако в чисто активной высокочастотной цепи скорость восстановления напряжения пропорциональна в соответствии с уравнением (3-72) частоте источника тока.

Следовательно, условия гашения дуги при отключении высокочастотной сети ($f \approx f_0$) могут оказаться более простыми в случае отключения индуктивной нагрузки по сравнению с условиями отключения цепи, содержащей чисто активную нагрузку. Таким образом, с повышением частоты тока источника условия отключения цепей с активной нагрузкой ухудшаются, а условия отключения индуктивных цепей могут, наоборот, улучшиться.

Частота тока обуславливает некоторые особенности восстановления электрической прочности промежутка за переходом тока через нулевое значение. В целом кривые восстанавливающейся прочности при высокой частоте также аппроксимируются прямолинейной зависимостью (3-19).

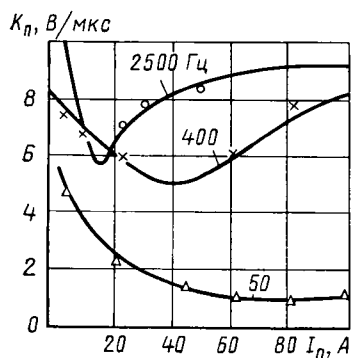


Рис. 3-51. Зависимость скорости роста прочности от тока

Начальная восстанавливающаяся прочность $U_{в.п}^0$ при частотах тока до 10 кГц оказывается примерно такой же, что и при частоте 50 Гц (рис. 3-23). Но скорость роста прочности K_p увеличивается с возрастанием частоты тока. Опытные зависимости K_p от тока при трех частотах даны на рис. 3-51. Эти зависимости имеют минимум, что можно объяснить следующим образом. При малых

токах большую роль в гашении дуги играет механическое растягивание ее столба, а при значительных начинают оказывать влияние электродинамические силы. Это влияние наблюдается при любой частоте, поэтому характер кривой $K_p = f(I_0)$ можно объяснить аналогично зависимости (рис. 3-23). Но при разных час-

тотах минимум в рассматриваемых кривых наблюдается при неодинаковых значениях тока: чем выше частота, тем меньше ток, при котором имеется минимум в кривой.

Кроме того, с повышением частоты тока абсолютные значения K_n возрастают. Это можно объяснить уменьшением продолжительности полупериода горения дуги с ростом частоты тока и снижением количества тепловой энергии, выделившейся в дуге до перехода через нулевое значение. В этих случаях электрическая прочность должна быстрее нарастать во времени. Смещение минимума в кривой $K_n = f(I_0)$ в сторону оси ординат с ростом частоты можно объяснить тем, что при возросшей частоте снижается значение тока, при котором электродинамические силы начинают оказывать существенное влияние на процесс гашения дуги. При высокой частоте первый переход тока через нулевое значение происходит при малом расстоянии между контактами, так как за короткое время продолжительности полупериода тока контакты не успевают разойтись на большое расстояние. Электродинамические силы в рычажных контактах, действующие на дугу, при прочих равных условиях увеличиваются с уменьшением расстояния между контактами. С уменьшением расстояния между контактами снижается значение тока, при котором электродинамические силы оказывают влияние на процесс гашения дуги. Это обстоятельство, очевидно, и приводит к смещению минимума в рассматриваемой кривой в сторону оси ординат с ростом частоты источника.

Для работы в цепях тока повышенной частоты нередко используются аппараты, предназначенные для установок тока промышленной частоты. При этом проводится пересчет номинальных параметров аппарата, например номинального тока, с учетом возрастания потерь в новых условиях работы. Так, в рубильнике с номинальным током $U_{ном} = 400$ А, рассчитанного на частоту 50 Гц, при повышенной и высокой частоте снижается значение допустимого номинального тока до следующих величин: при 400 Гц ток $I_{ном} = 390$ А, при 5000 Гц — 230, при 2500 Гц — 300, при 10 000 Гц — 210 А. Степень этого снижения возрастает при увеличении значений номинального тока, отнесенных к частоте 50 Гц.

При достаточно высокой частоте и значительных токах возникает необходимость в разработке новых типов аппаратов, так как аппараты, рассчитанные на частоту 50 Гц, оказываются непригодными для работы в условиях высокой частоты. К таким аппаратам можно отнести контакторы серии КВ, предназначенные для частот 2500 и 8000 Гц при напряжении 750 и 1500 В и номинальных токах от 135 до 1000 А; контакторы серии КВ, приводимые в действие электромагнитным приводом переменного тока частотой 50 Гц.

Конструктивная схема контактора серии КВ аналогична схеме контактора серии КТ6000 (см. ниже). На общем поворотном валу устанавливаются подвижные системы контактов и якорь электромагнита. Контактор — двухполюсный, каждый полюс имеет глав-

ные контакты и параллельные им дугогасительные, которые размыкаются и замыкаются неодновременно. При отключении цепи сначала размыкаются главные контакты, на которых электрическая дуга не образуется, так как весь ток при их размыкании переходит в параллельную цепь дугогасительных контактов. Последовательно с дугогасительными контактами включается обмотка магнитного дутья, направляющая дугу в камеру с узкой щелью. Система магнитного дутья обтекается током высокой частоты в течение короткого отрезка времени, соответствующего времени отключения цепи. Поэтому эта система и дугогасительные контакты не успевают разогреться до высоких температур в быстропеременном магнитном поле. Заметим, что падение напряжения на обмотке магнитного дутья в период протекания по ней полного тока цепи достигает 50—100 В.

Система двухступенчатого отключения цепи, примененная в контакторах серии КВ, имеет определенные недостатки. При больших номинальных токах (из-за поверхностного эффекта) применяют несколько параллельно включенных главных контактов. В этих условиях при высокой частоте происходит неравномерное распределение тока по контактам, в результате чего номинальный ток полюса становится меньше суммы токов, на которые рассчитан каждый из контактов. Гашение дуги при напряжении 1500 В затрудняется, и дуга выходит далеко за пределы камеры. Все это обуславливает большие размеры камеры контактора и увеличение объема с области ионизированных газов, возникающих при гашении дуги.

Ниже приведены технические данные отечественных высокочастотных контакторов типов К1000 и КВ:

Величины	К1000	КВ
f , Гц	500—8000	2500—10000
$U_{\text{ном}}$, В	800—1600	750—1500
$I_{\text{ном}}$, А	400—2400	135—650

§ 3-10. ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫЕ КОНТАКТОРЫ

Рассмотрим новые виды контакторов, в которых использованы контакты из жидкого металла (жидкометаллические контакторы) и в которых контактная система заключена в герметизированный корпус (герметизированные контакторы). Это — перспективные аппараты, находящиеся в стадии исследований и разработок.

В качестве контактных материалов в жидкометаллических контакторах в настоящее время применяют три разновидности жидких металлов и их сплавов — ртуть, галлий, сплавы Ga-In-Sn. Они создают в аппаратах ряд преимуществ:

1. Отпадает необходимость в создании контактного нажатия для обеспечения малого переходного сопротивления; в паре с твердым металлом оно оказывается незначительным, а именно: в паре

Hg-Cu сопротивление $\rho_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$; в паре Ga-Ni сопротивление $\rho_{\text{ж}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Сплав из 62% Ga и 25% In имеет $\rho_{\text{ж}} = 75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

2. Исключается вибрация контактов и локальный износ их под воздействием электрической дуги.

Однако относительно высокая температура плавления жидких металлов и сплавов не позволяет применять их в аппаратах для работы при низких температурах (галлий — плюс 30°C , ртуть — минус 38°C). К настоящему времени мало исследованы условия гашения дуги в аппаратах с жидкометаллическими контактами и электродинамическая стойкость жидкометаллического контактного мостика при прохождении по нему тока короткого замыкания. Еще не найден простой и надежный электромеханический способ управления положением жидкометаллического мостика и фиксации его положения при включении и отключении аппарата. В существующих аппаратах изменение их положения может приводить к перемещению мостика под действием силы тяжести и к непроизвольно-му замыканию (или размыканию) контактов.

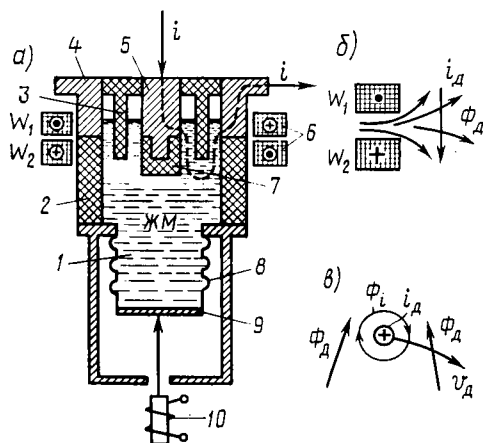


Рис. 3-52. Жидкометаллический контактор с сильфоном

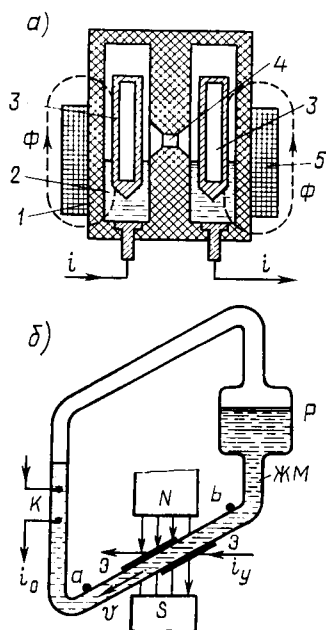


Рис. 3-53. Аппараты с жидкометаллическими контактами

На рис. 3-52, а схематически изображен контактор с жидким металлом (галлием). Аппарат включается приводом 10, воздействующим на основание 9 сильфона 8. Жидкий металл 1 перемыкает медные токоведущие элементы 4 и 5, обеспечивая путь для тока i . При отключении привода 10 основание 9 перемещается вниз вместе с жидким металлом ЖМ. Его поверхность оказывается на уровне изоляционных деталей 2 и 7. Возникают электрические дуги, сначала между электродами 4 и 5 и поверхностью

ЖМ, а затем только между этими электродами, огибая нижний край детали 3.

Встречно включенные обмотки 6 (W_1 и W_2) создают радиальное поле Φ_d магнитного дутья (рис. 3-52, б), с которым взаимодействует ток дуги i_d , образующий магнитный поток Φ_i . В магнитном поле дуги вращаются, чем обеспечивается их успешное гашение (рис. 3-52, в). Описанный аппарат коммутирует токи до 3,1 кА при напряжении 100 В, обеспечивая время гашения дуги 0,01 и время включения 0,02 с.

Другой контактор (рис. 3-53, а) включается при подаче напряжения на обмотку 5. Возникающая электромагнитная сила перемещает вниз ферромагнитные плунжеры 3. Тогда уровень жидкого металла 2 повышается и он заполняет отверстие 4 в электроизоляционном корпусе 1, обеспечив цепь тока i . При снятии напряжения полые плунжеры 3 перемещаются вверх, уровень ЖМ понижается и цепь тока i разрывается.

Поиски способов управления перемещением жидкого металла в аппаратах привели к созданию магнитогидродинамических реле (рис. 3-53, б), в которых герметизированная замкнутая система частично заполняется жидким металлом ЖМ (ртутью), размещаемым в резервуаре P . На участке $a-b$ ртуть находится в зоне магнитного поля между полюсами $N-S$. В поперечном направлении по этому участку (между электродами Э) пропускается ток управления i_y . Взаимодействие тока i_y с магнитным полем приводит к появлению сил, перемещающих ртуть в направлении v .

Из магнитной гидродинамики известна следующая формула

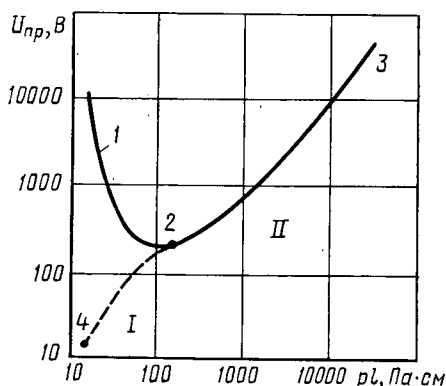


Рис. 3-54. Кривая Пашена А для воздуха при $T=273 К$

для электромагнитной силы $dP_{эм} (Н)$, действующей на элементарный объем жидкости $dV (м^3)$, который находится в магнитном поле с индукцией B и через который проходит ток с плотностью j : $dP_{эм} = jBdV \sin \Psi$, где Ψ — угол между векторами индукции B и плотности тока j . Под действием силы $P_{эм}$ жидкий металл перемещается по каналу, его уровень в левом столбике поднимается и замыкает контакты K . При снятии сигнала управления i_y уровни ЖМ в сообщающихся сосудах сравниваются, и контакты K размыкаются [10].

Контактная система герметизированных контакторов обычно работает в среде инертных газов или в вакууме. Существуют две области давлений газовой среды, в которых ее влияние на комму-

тационные характеристики аппаратов носит диаметрально противоположный характер.

На рис. 3-54 изображена зависимость пробивного напряжения $U_{пр}$ воздуха от произведения газа p на расстояние между контактами l . Кривая Пашена 1—2—3 относится к достаточно большим l , при которых напряженность поля $E < 10^6$ В/см и электростатической эмиссии с электродов нет. Кривая 2—4 относится к давлению $p \approx 10^5$ Па (атмосферное), когда при микрорасстояниях между электродами вследствие электростатической эмиссии в резко неравномерном поле возникают пробои промежутка при небольших напряжениях ($E > 10^6$ В/см). Область 1 небольших давлений характеризуется малым содержанием газовых частиц в промежутке, когда длина свободного пробега электронов соизмерима с расстоянием между контактами или меньше его. Тогда возможности возникновения носителей электричества за счет ионизации газовых частиц затруднены. С понижением давления они ухудшаются, поэтому пробивное напряжение возрастает при снижении p . В зоне II, наоборот, газовых частиц в промежутке много. Увеличение давления уменьшает длину свободного пробега электронов, затрудняет ионизацию и повышает пробивное напряжение.

Изменение давления воздуха влияет на характеристики дуги отключения. Вольтамперная характеристика дуги в воздухе при трех значениях давления дана на рис. 3-55, а. Существует эмпирическая формула для этой зависимости, справедливая при токах до нескольких десятков ампер (В/см):

$$E_d = 2 \sqrt[3]{p / V i_d}, \quad (3-77)$$

где p — давление, Па; i_d — ток дуги, А.

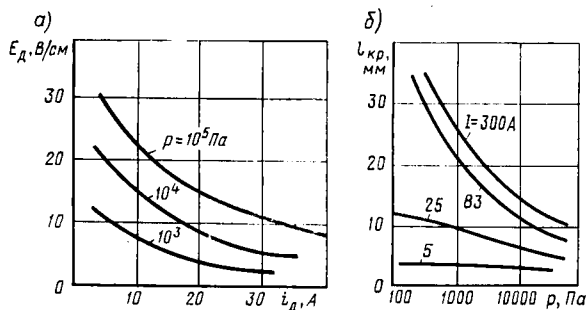


Рис. 3-55. Характеристики дуги при различных давлениях

Повышение давления увеличивает градиент напряжения дуги, так как увеличивает ее сопротивление вследствие ухудшения условий ионизации газа из-за уменьшения длины свободного пробега частиц, улучшения условий теплопередачи при малых расстояниях между частицами газа и снижения интенсивности испарения металла с электродов. Наоборот, снижение давления уменьшает

градиент напряжения дуги, а это приводит к увеличению критической длины дуги $l_{кр}$, необходимой для ее погасания при данном токе и напряжении (рис. 3-55, б). Все это ухудшает условия восстановления электрической прочности газовых промежутков при понижении давления в рассматриваемой области. Степень снижения прочности при уменьшении давления характеризует кривые (рис. 3-56) в условиях работы аппарата на разной высоте над уровнем земли.

В условиях очень большого разрежения воздуха ($p < 1$ Па) в промежутке оказывается мало газовых частиц, которые при ионизации могли бы образовать носители электричества — электроны и ионы. Поэтому с уменьшением давления затрудняются условия проведения тока через газовый промежуток, а условия гашения дуги улучшаются. Снижение давления здесь уменьшает время дуги.

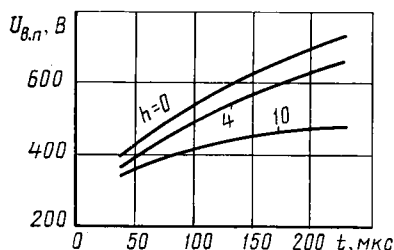


Рис. 3-56. Кривые восстанавливающей прочности в воздухе на разной высоте h над землей:

$I_0 = 60$ А

Понижение давления газа может вызвать явление *обратного движения дуги в магнитном поле*, в сравнении с тем, которое создается при нормальных условиях. Это движение имеет выраженный околокатодный характер — катодная область дуги перемещается в обратном направлении интенсивнее и за ней передвигается столб дуги. При токе выше 100 А в условиях пони-

женного давления может наблюдаться одновременное обратное движение и других зон дуги, что, видимо, объясняется действием на заряженные частицы лоренцовой силы в скрещенных электрическом и магнитном полях, совместным влиянием процессов движения вещества в потоках плазмы и движения температурного поля под влиянием тепловой асимметрии в приэлектродных зонах.

Область *I* кривой Пашена — это вакуум при значительных величинах межэлектродных расстояний l . По степени разрежения воздуха условно различают следующие диапазоны:

Вакуум	Давление p , Па
сверхвысокий	$< 10^{-5}$
высокий	$10^{-5} - 0,1$
средний	$0,1 - 100$
низкий	> 100

В области *I* условия гашения дуги в основном существенно улучшаются и аппараты, работающие в зоне таких давлений, относят к вакуумным. У них создается разрежение воздуха в герметизированной камере, чтобы обеспечить лучшие условия гашения дуги и изолировать ее высокотемпературную плазму от окружающей среды. Содержание газовых частиц в вакууме не-

значительно и решающую роль при коммутации тока приобретают процессы на катоде.

Вакуумные контакторы, являющиеся разновидностью герметизированных контакторов, обладают высокой дугогасительной способностью. В них электрическая дуга отключения отделена от окружающей среды, поэтому не образуются оксиды азота и не разрушаются детали аппарата их соединениями, нет опасности взрыва среды от термического воздействия дуги. Оптимальные технико-экономические показатели достигаются при $p=10^{-6} \div 10^{-8}$ Па. В условиях эксплуатации вакуум повышается вследствие поглощения молекул газа ионизированными парами металла с электродов. *Перенос тока в вакуумной дуге осуществляется за счет эмиттированных с катода электронов.* Совместно с парами металла они составляют газоразрядную среду, в которой горит дуга.

Затрудненные условия отдачи теплоты (конвекцией и теплопроводностью) от столба вакуумной дуги определяют небольшое падение напряжения на ней, соизмеримое с околоэлектродными напряжениями для соответствующих контактных материалов (рис. 3-57). Вследствие этого выделяемая в вакуумной дуге тепловая мощность относительно невелика.

Вакуум обладает наиболее высокой способностью восстанавливать электрическую прочность межконтактного промежутка (рис. 3-58). Скорость восстановления прочности в вакууме равня-

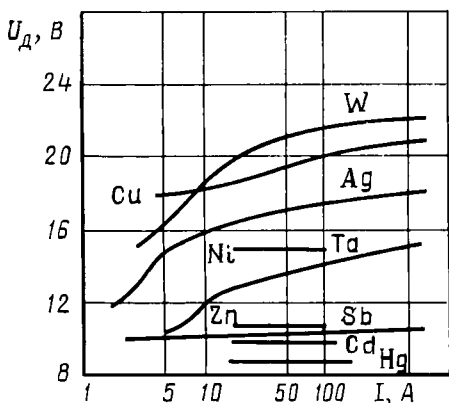


Рис. 3-57. Вольтамперная характеристика дуги в вакууме на контактах из разных материалов

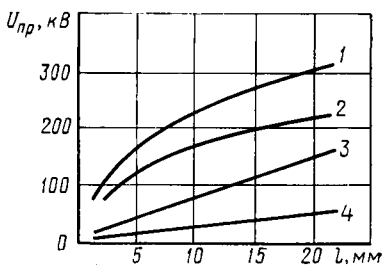


Рис. 3-58. Пробивное напряжение газовых промежутков в зависимости от их длины: 1 — вакуум; 2 — масло; 3 — элегаз; 4 — атмосферный воздух

ется 1—10 кВ/мкс, а время ее полного восстановления составляет 8—20 мкс. Это определяется высокими скоростями диффузии и конденсации паров металла. Высокие значения восстанавливаемой прочности и пробивного напряжения позволяют брать для вакуумных контакторов малый раствор контактов (1—2 мм).

В особых условиях работают контакты вакуумных аппаратов. Из материала контактов удаляют газовые частицы (обезгаживание), чтобы они не нарушали вакуум (при нагреве дугой частицы газа выходят из металла). Для снижения дуговой эрозии контакты выполняют из особо твердых материалов (W, Mo, Ta, Cr). Удельное нажатие в них составляет $\sim 1\text{--}2\text{ Н/А}$.

Коммутационная износостойкость вакуумных контактов достаточно высока благодаря малой продолжительности вакуумной дуги ($t_r < 0,01\text{ с}$) и сравнительно небольшой тепловой энергии, выделяющейся при ее горении (дуга гаснет при первом переходе тока через нулевое значение). Вследствие интенсивной деионизации и быстрого роста сопротивления дугового канала гашение дуги в вакууме сопровождается срезами тока при его подходе к нулю (практически мгновенными спадами его до нулевого значения). Большая производная тока во времени определяет высокие перенапряжения $U_{\max} = L di/dt$, где L — индуктивность цепи, Гн.

На рис. 3-59 изображены формы кривых тока и напряжения при работе вакуумного аппарата и даны опытные зависимости тока среза $I_{\text{ср}}$ и перенапряжений $U_{\max}$ от тока I_0 . Для уменьшения среза тока и перенапряжений на поверхности контактов, изготовляемых из твердых материалов, применяют включения из металлов с низким потенциалом ионизации и давлением паров металла (Bi, Cd, Sb, Sn или их сплавы), которые укладывают в специальные канавки. Можно применять также контактные

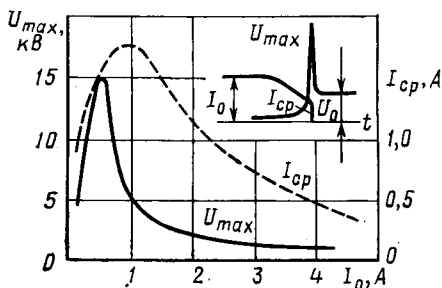


Рис. 3-59. Зависимости тока среза и перенапряжений от отключаемого вакуумным аппаратом тока I_0 (в сети $U_{\text{ном}} = 220\text{ В}$)

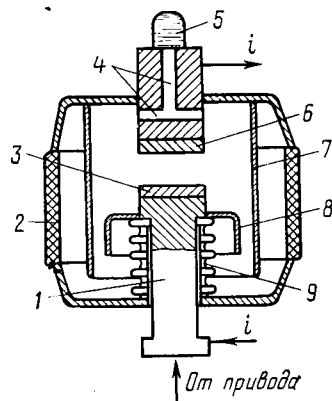


Рис. 3-60. Дугогасительная камера вакуумного контактора

накладки из совокупности тех или других металлов, например Fe (68%) + Cu (28%) + Sb (4%). Для защиты от перенапряжений при срезе тока можно использовать также R—C-цепочки, шунтирующие объекты нагрузки (трансформаторы).

Дуогасительная камера вакуумного контактора (рис. 3-60) образует разрыв цепи тока между неподвижным 6 и подвижным 3 контактами (раствор около 1 мм). При включении от электромагнитного привода подвижной контактный стержень 1 перемещается вверх, при этом сильфон 9 (из нержавеющей стали, бериллиевой меди) сжимается. Изоляционный корпус 2 (из стекла или керамики) защищен металлическим экраном 7 от оседания на нем паров металла, возникающих при гашении дуги. Аналогичную функцию для сильфона 9 выполняет экран 8. Каналы 4 служат для откачки воздуха и создания вакуума в камере (10^{-4} — 10^{-5} Па). Колпачок 5, заполненный эпоксидной смолой, предохраняет от внешних воздействий сварные швы в месте заварки выходного элемента из камеры. Отключение производится специальной пружиной при снятии включающей силы от привода. Технические данные вакуумных контакторов с камерами серии КДВ на 660 и 1140 В приведены в табл. 3-5.

Таблица 3-5

Параметры	Напряжение, В	Номинальный ток, А		
		63	160	400
Включающая способность, А	660	2700	4600	8 800
	1140	1650	2880	6 500
Отключающая способность, А	660	1500	2500	4 800
	1140	1000	1750	3 450
Стойкость при сквозных токах, А:				
электродинамическая	660	4000	5000	10 000
	1140	4000	5000	10 000
термическая в течение 0,2 с	660	3200	4000	8 000
	1140	3200	4000	8 000
Радиус площадки касания контактов, мм	—	0,35	0,44	0,88
Контактное нажатие, Н	—	27	42	168
Переходное сопротивление контактов (стягивание), мкОм	—	275	220	110
Износостойкость, цикл	—	(15—20) 10^6		
Диапазон рабочих температур, °С	—	— (—40)—(+70)		

В последнее время ведутся разработки *силовых герметизированных контакторов (герсиконов)* на основе модернизации герконов (см. § 2-3). Обычный геркон (см. § 2-4), в котором ферромагнитные пластины одновременно выполняют функции якоря магнитной системы и токоведущих элементов с контактами, имеет ограниченные возможности для повышения номинального тока,

проходящего через контакты. Создаваемая в герконе электромагнитная сила $P_{эм}$ должна преодолеть силу сопротивления его пластин $P_{пр}$ при их изгибе и создать необходимую силу нажатия P_k в контакте. Первая из них по (1-60) равна $P_k = K_1 I_0^2$, а вторая по (2-14) равна $P_{пр} = K_2 b h^3$, где K_1 и K_2 — коэффициенты пропорциональности, b — ширина пластины; h — ее толщина.

Сечение пластины $S = ab$ выбирается пропорционально току I_0 (при постоянной его плотности). Поэтому $P_{пр} = K_2 h^2 I_0$. Тогда действующая между пластинами электромагнитная сила $P_{эм}$ (рис. 3-61, а) $P_{эм} = K_1 I_0^2 + K_2 h^2 I_0$.

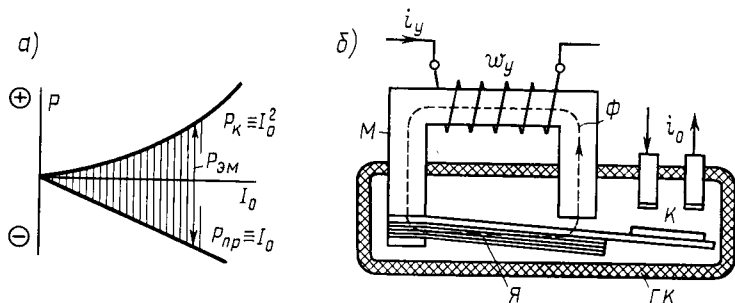


Рис. 3-61. Электромагнитная сила геркона в функции тока (а) и устройство герсикона (б)

Следовательно, с ростом коммутируемого тока I_0 резко возрастает необходимая для управления герконом электромагнитная сила. Это увеличивает габариты и мощность управляющей обмотки. Предел возможностей обычных герконов по нажатию в контактах ($\sim 0,5$ Н) и зазору между ними ($\sim 0,3$ мм) ограничивает допустимый для него ток до ~ 1 А. С ростом тока снижается чувствительность геркона, определяемая резко возрастающей магнитодвижущей силой срабатывания, увеличиваются размеры обмотки управления, нарушаются условия для рациональной организации магнитных полей, ухудшаются его технические показатели.

При построении силовых герконов (герсиконов) для токов выше 5 А, т. е. контакторов на герконах, необходимо разделить функции якоря электромагнитной системы и контактов, а также применить организованную магнитную систему для проведения магнитного потока Φ . На рис. 3-61, б показан один из принципов построения таких герсиконов [11]. В герметизированном корпусе ГК размещаются полюса магнитопровода, плоская ферромагнитная пружина якоря Я, контакты К. Магнитопровод М и обмотка w_y находятся вне герметизированного объема. Якорь Я набирается из ферромагнитных пластин, которые имеют небольшую толщину, чтобы не увеличивать противодействующее усилие. Кон-

тактная система K имеет два разрыва, что позволяет увеличивать коммутируемое напряжение, но в то же время снижает допустимое значение тока через контактор. При необходимости увеличить этот ток в герсиконе осуществляется один разрыв в контактах вместо двух.

Промышленный образец герсикона КМГ-12 для тока 6,3 А и напряжения 440 В имеет магнитодвижущую силу (МДС) срабатывания — 350 А, МДС отпускания 30 А, время срабатывания 1—10 мс, мощность обмотки 1,8 Вт, переходное сопротивление контактов 0,007 Ом, массу 0,2 кг, размеры 84×55×28 мм, коэффициент управления (отношение коммутируемой мощности к мощности обмотки управления) 12 700, износостойкость — 10^7 срабатываний, частоту коммутаций до 1200 ч⁻¹.

§ 3-11. СИНХРОННЫЕ КОНТАКТОРЫ

Дуга переменного тока гаснет значительно быстрее, если контакты отключающего аппарата расходятся незадолго до перехода тока через нулевое значение. На рис. 3-62, а изображена положительная полуволна переменного тока. Если точка А соответствует моменту размыкания контактов и образования дуги, то дуга в этом полупериоде горит в течение времени t_0 . За это время через дугу проходит количество электричества, определяемое площадью S_1 , и выделенная в дуге энергия относительно большая. Если контакты аппарата размыкаются непосредственно перед переходом тока через нулевое значение (точка В), в дуге выделяется значительно меньшая энергия, так как время ее существования t_2 , мгновенные значения токов и площадь S_2 значительно меньше, чем в первом случае. Таким образом, если контакты аппарата расходятся перед переходом тока через нулевое значение, дуговой столб не успевает существенно разогреться и аккумуляровать в своем объеме значительный запас теплоты. Эта теплота быстро рассеивается вблизи перехода тока через нулевое значение, а восстанавливающаяся прочность межконтактного промежутка приобретает более высокие значения. Создаются условия, при которых дуга гасится, не успев разогреться. Отключение цепи переменного тока становится практически бездуговым. *Аппараты с фиксированным расхождением контактов перед нулевым значением тока называют синхронными.*

Резкое уменьшение времени дуги, достигаемое в синхронных аппаратах, существенно снижает износ контактов (рис. 3-62, б). Гашение дуги при малом расстоянии между контактами позволяет уменьшить раствор контактов и ход подвижной системы аппарата, а это создает возможность для облегчения электромагнитного привода. Исследования показывают, что время упреждения t_0 (от момента размыкания контактов до момента перехода тока через нулевое значение) оказывает заметное влияние на восстанавливающуюся прочность межконтактного промежутка, которая

и в условиях синхронного отключения нарастает за нулевым значением тока по прямолинейному закону (3-19).

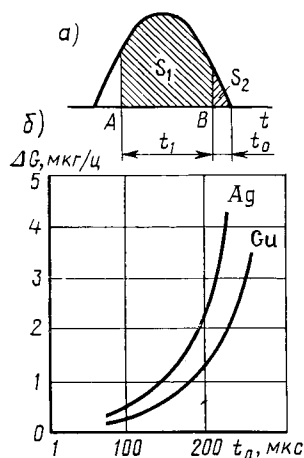


Рис. 3-62. Удельный износ контактов в функции времени дуги:
 $I_0 = 250 \text{ А}$

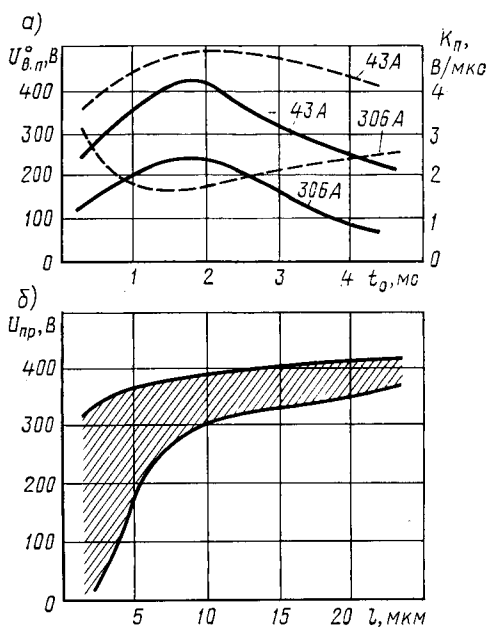


Рис. 3-63. Восстанавливающаяся прочность (а) и пробивное напряжение (б) при синхронном отключении:
— $U_{0.н}^0$; K_n

На рис. 3-63, а даны зависимости начальной прочности $U_{0.н}^0$ (для $t=0$) и скорости роста прочности K_n от времени упреждения t_0 . Зависимости относятся к медным контактам при скорости их расхождения $v_p = 0,4 \div 1,0 \text{ м/с}$ и двум значениям отключаемого тока (43 и 306 А). Оптимальные условия синхронного отключения соответствуют времени $t_0 = 1 \div 2 \text{ мс}$ (и расстоянию между контактами около 1 мм), если восстанавливающаяся прочность оказывается максимальной. Вероятно, при меньшем расстоянии восстанавливающаяся прочность снижает влияние металлического мостика и паров металла, а при большем — тепловое влияние столба развившейся электрической дуги.

Для условий синхронного отключения характерны малые межконтактные зазоры. Зависимость пробивного напряжения от их длины l имеет большую зону разброса (рис. 3-63, б). Вероятно, это можно объяснить влиянием случайных факторов, например вытягиванием бугорков (микроострий) металла с поверхности силами электрического поля и др.

Существует ряд принципов построения аппаратов, в каждом из которых выработаны условия подачи сигнала на размыкание контактов до перехода переменного тока через нулевое значение. Рассмотрим некоторые виды таких аппаратов и схемы их синхрони-

зации. Как известно, напряжение на активно-индуктивном участке электрической цепи опережает по фазе переменный ток, протекающий по этому участку. Следовательно, кривая напряжения на этом участке проходит через нулевое значение раньше, чем кривая тока. Это обстоятельство позволяет получить нулевой синхронизирующий сигнал перед переходом тока через нуль.

На рис. 3-64, *a* изображена схема участка $R-L$, по которому проходит переменный ток i . Падение напряжения между точками A и B

$$U_{AB} = iR + L di/dt = R [i + (L/R) di/dt].$$

Это напряжение равно нулю при условии:

$$i + (L/R) di/dt = 0. \quad (3-78)$$

При подходе к нулю синусоиду тока можно заменить прямой линейной зависимостью. Тогда на отрезке времени t_0 (рис. 3-64, *б*) справедливо равенство $di/dt = -I_1/t_0$. Подставив это соотношение в (3-78), для тока $i = I_1$ и времени $t = t_1$ получим $I_1 - (L/R)(I_1/t_0) = 0$. Отсюда отрезок времени t_0 до момента перехода тока i через нулевое значение, когда напряжение на участке AB цепи становится равным нулю, определяется зависимостью

$$t_0 = L/R. \quad (3-79)$$

Следовательно, в этом методе синхронизации учитывается, что за время $t = t_0$ до момента перехода тока через нулевое значение напряжения U_0 на нуль-органе становится равным нулю, и этот орган срабатывает, осуществляя подачу сигнала на отключение аппарата до перехода тока через нулевое значение. При необходимости уменьшить U_0 применяется делитель напряжения $R1-R2$.

Чтобы исключить влияние инерционности всей подвижной системы контактного аппарата на точность момента синхронного отключения, разработаны автономные синхронизирующие устройства, встраиваемые непосредственно в контакты аппарата и независимые от его основного привода. На рис. 3-65 даны примеры таких устройств. Синхронизирующий электромагнитный элемент (рис. 3-65, *a*), состоящий из синхронизирующего электромагнита с обмоткой ω и связанными с его якорем синхронными контактами ($СК$), включается параллельно главным контактам $ГК$. Во включенном состоянии аппарата практически весь ток цепи I_0 проходит по $ГК$, так как их сопротивление существенно меньше сопротивления шунтирующего контура $СК$, рассчитанного на крат-

ковременное прохождение тока (для 50 Гц — меньше 0,01 с). При отключении аппарата и расхождении ГК со скоростью v_p ток цепи переходит в параллельную цепь. Протекая по обмотке электромагнита ω , этот ток развивает электромагнитную силу $P_{эм}$, которая оставляет включенными контакты СК до тех пор, пока ток не снизится до небольших величин перед переходом через нулевое значение (подвижный синхронный контакт СК как бы «следит» за расходящимися контактами до перехода тока через нулевое значение). Перед нулем тока электромагнитная сила $P_{эм}$ становится меньше силы P_n возвратной пружины и контакты СК размыкаются, осуществляя синхронное отключение цепи перед нулем тока.

На рис. 3-65, б изображено устройство, построенное на электродинамическом принципе. Когда аппарат включен, весь ток i проходит через главные контакты ГК. При отключении первыми размыкаются контакты ГК и ток переходит в параллельный синхронизирующий контур, состоящий из последовательно включенных обмотки ω , гибкой упругой токоведущей пластинки П

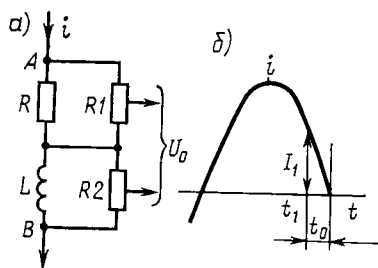


Рис. 3-64. Схема упреждения напряжения по отношению к току

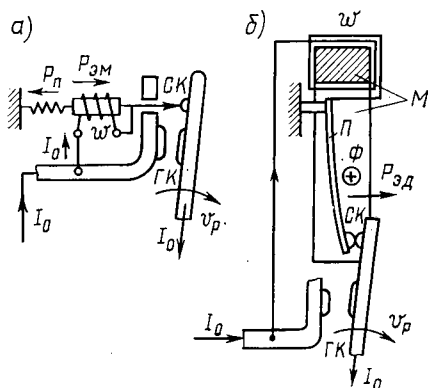


Рис. 3-65. Синхронные устройства на электромагнитном и электродинамическом принципах действия

и синхронных контактов СК. Обмотка ω создает магнитное поле, которое с помощью магнитопровода М подводится к зоне пластинки П. Взаимодействие этого магнитного поля с током, проходящим по пластинке, вызывает появление электродинамической силы $P_{эд}$, которая удерживает вспомогательные контакты СК в замкнутом состоянии, прижимая пластинку П к перемещающимся вправо подвижным контактам отключающего аппарата. При подходе тока к нулевому значению $P_{эд}$ также стремится к нулю и вспомогательные контакты СК синхронно отключают электрическую цепь, при этом пластинка П за счет упругих сил возвращается в исходное положение (влево).

Синхронный контактор с применением полупроводниковых диодов, удлиняющих паузу тока до продолжительности одного полупериода (0,01 с), изображен на рис. 3-66. Когда подана команда на отключение, снимается напряжение с включающей обмотки 2 и удерживающая сила P_v . Под действием силы P_0 пружины 1 главные контакты ГК размыкаются и ток переходит в параллельную цепь синхронизирующего устройства. Одновременно снимается блокировка якорей электромагнитов Э1 и Э2 упорами У1 и У2. Ток I_0 в зависимости от направления проходит через одну из ветвей с Д1 или Д2, синхронизирующими контактами СК1 или СК2 и обмоткой электромагнита Э1 или Э2. Если, например, ток проходит через цепь Д1—СК1—Э1, то развиваемая протекающим по обмотке током электромагнитная сила удерживает якорь электромагнита в притянутом состоянии до конца полупериода тока. В это время якорь электромагнита Э2, по обмотке которого ток не проходит, под действием силы пружины отходит вправо и контакты СК2 размыкают эту цепь. Следующая полуволна тока через цепь Д1—СК1 не проходит, так как ее запирает диод Д1; она не проходит также и через цепь Д2—СК2—Э2, так как контакты СК2 к ее началу расходятся. В течение времени, соответствующего второй полуволне тока, якорь электромагнита Э1 отходит вправо, контакты СК1 тоже размыкаются и цепь отключается окончательно, так как образуется разрыв всех трех параллельно включенных контактов.

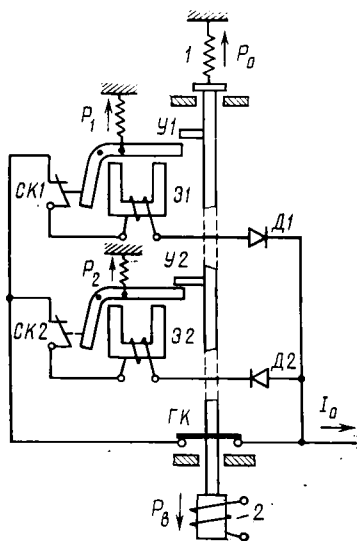


Рис. 3-66. Синхронный контактор с полупроводниковыми диодами

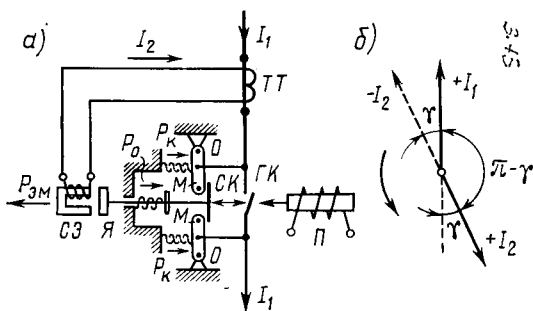


Рис. 3-67. Синхронный контактор с фазосдвигающим трансформатором тока

Схема синхронного контактора с фазосдвигающим трансформатором ТТ дана на рис. 3-67, а. Это трансформатор, включенный в цепь главного тока I_1 , имеет относительно большую угловую погрешность, обусловленную наличием воздушных зазоров в магни-

топроводе и соответствующим подбором параметров вторичной цепи. Из теории трансформаторов тока известно, что вторичный ток ($+I_2$) отстает от первичного ($+I_1$) на угол $(\pi - \gamma)$, где γ — угловая погрешность трансформатора тока (рис. 3-67, б). Электромагнитная сила, создаваемая на якоре $Я$ током I_2 , пропорциональна квадрату этого тока [см. формулу (2-16)] и не зависит от его знака (плюс или минус). С этой точки зрения ток $+I_2$ равнозначен току $-I_2$, который опережает ток $+I_1$ на угол γ (рис. 3-67, б). Поэтому переходы через нулевое значение тока I_2 и создаваемой им электромагнитной силы на якоре $Я$ опережают на угол γ переходы первичного тока I_1 через нуль. Это значит, что кривая магнитного потока в синхронизирующем электромагните $СЭ$ и обусловленная им электромагнитная сила притяжения якоря $Я$ проходят через нулевое значение раньше, чем кривая отключаемого тока I_1 . Это позволяет синхронизирующим контактам $СЭ$ отключаться синхронно перед нулевым значением главного тока.

Для включения аппарата (рис. 3-67) подается напряжение на привод $П$, включаются главные контакты $ГК$ (через них проходит практически весь ток I_1), параллельные им синхронные контакты $СК$, сжимается отключающая пружина P_0 и притягивается к магнитопроводу якорь $Я$ электромагнита $СЭ$. При включении массивные неподвижные контакты $СЭ$ «проваливаются», сжимая контактные пружины P_k .

При отключении снимается напряжение с привода $П$ и размыкаются главные контакты $ГК$. Ток I_1 переходит в параллельную цепь синхронизирующих контактов $СК$, удерживаемых во включенном состоянии электромагнитом $СЭ$, обмотка которого питается от трансформатора тока $ТТ$. Перед переходом через нулевое значение главного тока I_1 вторичный ток I_2 в $ТТ$ становится равным нулю (благодаря угловой погрешности), электромагнитная сила в $СЭ$ исчезает и отключающая пружина размыкает связанные с якорем $Я$ электромагнита $СЭ$ синхронные контакты $СК$. Они размыкают цепь тока I_1 перед его переходом через нулевое значение. Массивные элементы $М$ контактов $СЭ$ вследствие большой инерционности во время движения подвижного мостика медленно поворачиваются вокруг осей $О$ и практически остаются неподвижными, чем обеспечивается необходимый для разрыва цепи тока межконтактный зазор в синхронных контактах $СК$.

§ 3-12. ГИБРИДНЫЕ КОНТАКТОРЫ

Гибридный контактор — это контактный аппарат с полупроводниковой приставкой, шунтирующей главные контакты и предназначенной для упрощения процессов коммутации тока. В гибридных контакторах дуга полностью не исключается, она существует на контактах в течение короткого времени перехода тока с них в полупроводниковую приставку. Переход начинается с момента достижения напряжением дуги значения, равного порогово-

му напряжению тиристора (около 1 В). Износ главных контактов от этой кратковременной дуги небольшой и их коммутационная износостойкость соизмерима с механической износостойкостью аппарата.

Для облегчения условий отключения постоянного тока применяют включение предварительно заряженной емкости C до напряжения $U_{c.0}$ параллельно главным контактам ГК, которая в период отключения ГК разряжается на них и создает ток противоположного направления по отношению к основному току I_0 (от источника U_0). При переходе результирующего тока через нулевое значение условия для гашения дуги на ГК оказываются наиболее благоприятными. Схема

такого аппарата (рис. 3-68, а) содержит тиристор T , включенный последовательно с конденсатором C . После размыкания ГК (в момент t_0) начинает увеличиваться расстояние l между контактами (рис. 3-68, б) и напряжение на контактах u_k (рис. 3-68, в). В момент t_1 , когда сигнал u_k достигает необходимой величины, блок управления БУ (рис. 3-68, а) открывает тиристор T и конденсатор C начинает

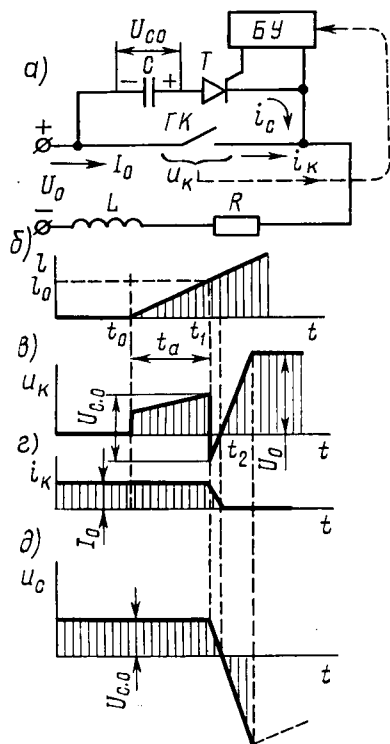


Рис. 3-68. Гибридный контактор постоянного тока

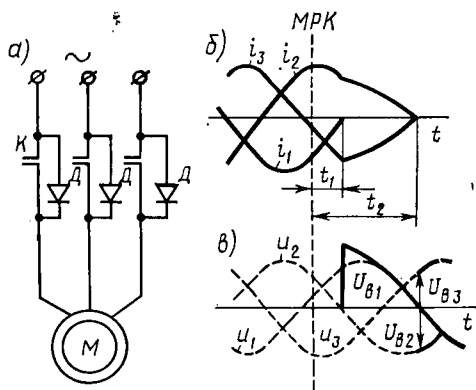


Рис. 3-69. Гибридный контактор с полупроводниковыми вентилями

разряжаться на ГК. Навстречу основному току I_0 через них проходит ток разряда конденсатора. При нулевом значении суммарного тока i_k (рис. 3-68, г) дуга на главных контактах гаснет и ток через них прерывается. После перезаряда тиристор T закрывается. Ход изменения кривых напряжений u_k на ГК и u_c на конденсаторе (рис. 3-68, д) дан при идеальных условиях мгновенной коммутации тока.

Элементарная схема гибридного аппарата переменного тока дана на рис. 3-69, *а*. Шунтируя возникающие на размыкающихся контактах K электрические дуги, неуправляемые диоды D принимают токи и окончательно разрывают их, ограничивая время горения дуги на контактах, отсчитываемое от момента MPK .

На рис. 3-69, *б* даны кривые изменения токов в фазах i_1 , i_2 и i_3 во времени после момента размыкания контактов K . В первой фазе, разрывающей ток i_1 , дуга на контактах горит в течение времени t_1 , в двух других фазах (с токами i_2 и i_3) — в течение t_2 . Восстанавливающееся напряжение на контактах и диодах фаз $U_{в1}$, $U_{в2}$ и $U_{в3}$ изменяется соответственно кривым, изображенным на рис. 3-69, *в*.

Отечественная промышленность выпускает гибридные контакторы, построенные на основе контакторов общепромышленного применения серий КТ-6000; КТ-7000. В цепь главных контактов включаются трансформаторы тока $ТТ$; параллельно K и $ТТ$ присоединяется тиристорная приставка (рис. 3-70, *а*).

Во включенном состоянии весь ток проводят главные контакты, а тиристоры закрыты, так как анодное напряжение на них (между точками 1 и 2) меньше порогового (1 В). При размыкании контактов $ГК$ появляется кратковременная дуга, и когда напряжение на ней превышает пороговое для тиристоров, один из них открывается (при небольшом напряжении, так как на управляющие электроды через диоды $D1$ и $D2$ подаются сигналы управления от вторичных обмоток трансформаторов $ТТ$). Тиристор $T1$ (или $T2$) проводит прямую полуволну тока, для обратной полуволны тока он закрыт. Второй тиристор для обратной полуволны также не открывается, так как ток с K переходит в параллельную цепь и с вторичных обмоток $ТТ$ сигналы на управляющие электроды не подаются и цепь тока окончательно обрывается.

На рис. 3-70, *б* изображены графики изменения во времени тока на главных контактах $i_{ГК}$, в тиристорной приставке i_T и напряжения на коммутирующем аппарате U_{1-2} . Момент t_1 соответствует размыканию $ГК$, t_2 — полному переходу тока с $ГК$ в тиристор, t_3 — отключению цепи и восстановлению напряжения $U_{в}$. Напряжение U_{1-2} до момента t_1 определяется напряжением замкнутых контактов, во времени $t_1 - t_2$ — напряжением кратковременной дуги, в период $t_2 - t_3$ — пороговым напряжением тиристоров.

При сквозных токах короткого замыкания электродинамические силы могут самопроизвольно разомкнуть контакты на короткое время. Напряжение на возникшей дуге становится выше порогового для тиристоров, и они открываются. Перешедший в тиристоры ток короткого замыкания может разрушить их. Для предотвращения такого включения тиристоров применяются защитные устройства, выполненные по специальной схеме. При $I_{к.з} \geq 10 I_{ном}$ эта схема срабатывает и шунтирует управляющие электроды $T1$ и $T2$ (рис. 3-70, *а*), предотвращая переход тока из $ГК$ в тири-

сторы. Стабилитроны *Сб.1* и *Сб.2* ограничивают напряжение на управляющих электродах до допустимой величины. Цепь *R — C* снижает скорость нарастания и амплитуду восстанавливающегося напряжения, а также защищает тиристоры от кратковременных перенапряжений. Технические параметры некоторых отечественных гибридных контакторов даны в табл. 3-6.

Таблица 3-6

Параметры	Типы контакторов				
	КТ-7000Б	КТП-7000Б	КТ-6500	КТП-6500	КТ-7032
Номинальный ток, А	100, 160	100, 160	100, 160	100, 160	250
Номинальное напряжение, В	380	380	660	660	380
Износостойкость, циклы	10^7	$15 \cdot 10^6$	10^7	$15 \cdot 10^6$	10^7
Допустимая частота циклов, 1/ч	1200	2000	1200	2000	1200
Число полюсов	2—5	2—4	2—5	2—4	2—5
Род тока обмотки управления	~	=	~	=	~
Напряжение управления, В	110—380	24—220	110—380	24—220	110—500

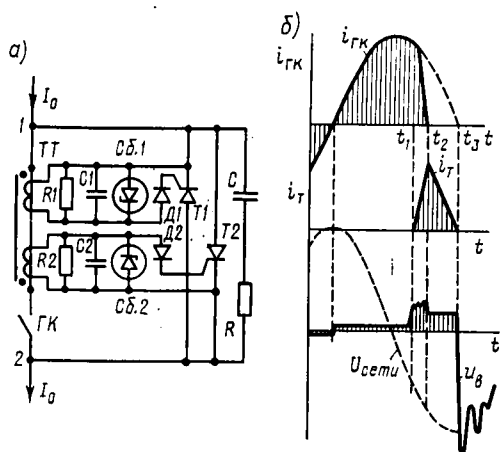


Рис. 3-70. Схема серийного гибридного контактора

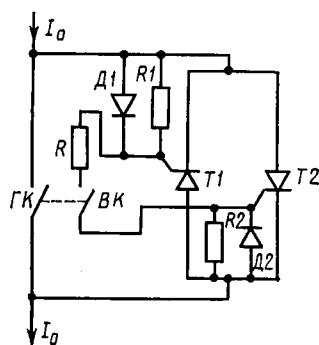


Рис. 3-71. Гибридный контактор с вспомогательными контактами

Другая схема гибридного контактора дана на рис. 3-71. Тиристоры *Т1* и *Т2* шунтируют главные контакты *ГК*. Управление тиристорами осуществляется вспомогательным контактором *ВК*, связывающим через ограничивающий резистор *R* управляющие электроды тиристоров *Т1* и *Т2*. После размыкания контактов *ГК* и пе-

перехода тока в один из тиристоров размыкаются контакты BK , прекращая подачу управляющих сигналов на соответствующие электроды тиристоров. При первом переходе тока через нулевое значение $T1$ и $T2$ закрываются и цепь тока I_0 оказывается разорванной. Параллельно включенные диоды — резисторы $D1-R1$ и $D2-R2$ — обеспечивают подачу управляющих сигналов на тиристоры $T1$ и $T2$ и необходимый режим их работы.

§ 3-13. ТИРИСТОРНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

В настоящее время находят широкое применение бесконтактные аппараты на силовых полупроводниковых приборах, которые выполняют функции пускателей. К ним относятся, в частности, *тиристорные пускатели*.

В табл. 3-7 сопоставлены контактные и полупроводниковые электрические аппараты. Так как эти аппараты имеют преимущества и недостатки, то в одних условиях более целесообразны контактные, а в других — бесконтактные. Контактные аппараты находят преимущественное применение для дискретной коммутации (включение — отключение) сравнительно больших токов и напряжений, бесконтактные — при небольших токах и напряжениях, для плавного управления и регулирования тока и как быстродействующий аппарат.

Таблица 3-7

Особенность, свойство	Аппараты	
	контактные	бесконтактные
Наличие подвижной системы; механический износ деталей	Подвижная система имеется; механическая износостойкость $N_{\text{мех}} = 10^7$ срабатываний (контактов)	Подвижной системы нет; детали не изнашиваются механически
Образование дуги и искры при коммутации тока; электрический износ деталей	Дуга образуется; износостойкость электрическая $N_{\text{эл}} = 10^6$ срабатываний	Дуга не образуется; электрического износа нет
Быстродействие аппарата и допустимая частота срабатываний	Типичные времена срабатываний — десятки, сотые доли секунды; частота — до тысяч срабатываний в час	Быстродействие очень высокое; частота срабатываний до 10^5 — 10^6 в час
Стойкость к ударным нагрузкам и вибрациям	Подвержены влиянию ударных нагрузок и вибраций	Неподвержены влиянию ударных нагрузок и вибраций, исключая элементы подсоединения
Работа во взрывоопасных средах	Могут работать лишь при наличии защитных оболочек	Работают надежно

Особенность, свойство	Аппараты	
	контактные	бесконтактные
Возможность плавного изменения тока в управляемой цепи (усилительный режим) с переходом в скачкообразное его изменение (коммутационный, релейный режимы)	Нет возможности плавного управления, работают только в коммутационном режиме	Работают надежно в любом режиме
Управление слабыми сигналами в коммутируемой цепи	Слабые сигналы для управления почти не используются	Легко осуществляется управление слабыми сигналами
Глубина коммутации h_k ; гальваническая развязка в коммутируемой цепи; видимый разрыв цепи*	Высокая $h_k = 10^7 \div 10^{14}$; видимый разрыв есть	Невысокая $h_k < 10^7$; полная развязка не достигается; видимого разрыва нет
Построение аппарата на большое число независимых коммутируемых цепей	Легко осуществляется создание аппаратов на много коммутируемых цепей	Многоцепной аппарат возможен при большом увеличении количества элементов, стоимости и габаритов аппарата
Тепловые потери и нагрев в коммутирующем элементе при токах нагрузки	Потери и нагрев небольшие, так как падение напряжения на коммутирующем элементе при включенном состоянии обычно составляет единицы мВ	Потери высокие, так как падение напряжения на включенном тиристоре (транзисторе) достигает 1 В
Устойчивость к перенапряжениям	Выдерживают любые перенапряжения; пробивное напряжение промежутка между контактами — до десятков киловольт (для 1 см — около 33 000 В)	Требуется специальная защита от перенапряжений; обратные напряжения обычно измеряются лишь сотнями вольт

* Глубина коммутации $h_k = R_{отк}/R_{вкл}$, где $R_{отк}$ и $R_{вкл}$ — электрические сопротивления коммутирующего элемента аппарата в отключенном и включенном состояниях.

Особенность, свойство	Аппараты	
	контактные	бесконтактные
Токовые перегрузки	Практически выдерживают любые токовые перегрузки (при времени протекания тока $t_{к.з} = 0,01$ с допустима перегрузка током примерно в 700 раз в сравнении с номинальной нагрузкой)	Необходима специальная защита от токов короткого замыкания (при $t_{к.з} = 0,01$ с допустима токовая перегрузка до 20—30 раз в сравнении с номинальной)
Стоимость	Возможно некоторое снижение стоимости за счет улучшения технологии производства	Стоимость бесконтактных аппаратов в несколько раз выше в сравнении с контактными; благодаря совершенствованию технологии полупроводников возможно значительное снижение
Надежность	Надежность высокая, но зависит от качества обслуживания	Надежность высокая и почти не зависит от обслуживания
Обслуживание	Требуется обслуживание техническим персоналом	Требуется только периодическая чистка
Размеры аппарата	Очень компактные аппараты	Размеры в несколько раз больше, чем у контактных; благодаря усовершенствованию возможно значительное уменьшение размеров
Звуковые эффекты	Шум при работе — гудение электромагнита	Отсутствуют шумы
Невосприимчивость к искажениям управляющего сигнала	Практически невосприимчивы к искажениям сигнала управления	Возможны ложные срабатывания, в том числе от случайных импульсов с малой продолжительностью

Для построения бесконтактных пускателей широко используются *тиристоры* и неуправляемые *диоды*. На рис. 3-72 изображены их вольтамперные характеристики. Кривая 1—3—4 — характеристика диода, а также тиристора, когда на его управляющий электрод подан необходимый ток управления; кривая 1—2—4 — характеристика тиристора при отсутствии тока управления.

Другие виды силовых полупроводниковых приборов также находят применение в аппаратах управления. К ним относятся *сдвоенные тиристоры*, называемые *симисторами*, которые обладают свойствами встречно-параллельно соединенных тиристоров, но имеют лишь один управляющий электрод. При подаче управляющего сигнала симистор открывается для обоих полувольт переменного тока, при снятии сигнала — закрывается для них. Оптронные тиристоры устраняют недостаток обычных тиристоров — наличие гальванической связи между управляющей и управляемой цепями. В оптронных тиристорах гальваническая развязка между этими цепями очень надежная — сопротивление изоляции между ними достигает 10^{16} Ом при испытательном напряжении до 10 кВ. Они позволяют упростить схемы бесконтактных аппаратов управления благодаря устранению разделительных трансформаторов.

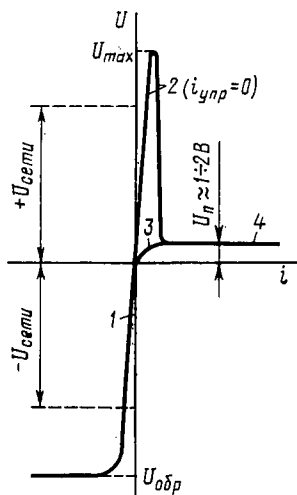


Рис. 3-72. Вольтамперная характеристика тиристора

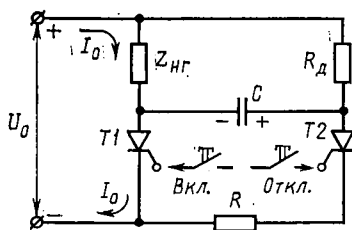


Рис. 3-73. Схема силовой части тиристорного коммутатора постоянного тока

Силовые транзисторы, выпускаемые на токи до сотен ампер и напряжения до 500 В, позволяют устранить узлы принудительной коммутации в бесконтактных аппаратах благодаря возможности управлять силовым током с помощью изменения тока базы (в тиристорах ток управления лишь открывает, но не закрывает силовую цепь).

Элементарная схема силовой части тиристорного коммутатора постоянного тока показана на рис. 3-73. Для включения силового тока через сопротивление нагрузки $Z_{н\Gamma}$ кнопкой *Вкл.* на управляющий электрод тиристора $T1$ подается ток управления и он открывается, аппарат включается.

Чтобы аппарат был подготовлен к отключению тока I_0 , конденсатор C заряжается через резистор R_d до напряжения U с указанной на рисунке полярностью (при включенном $T1$). Для отключения тока I_0 кнопкой *Откл.* подается управляющий сигнал на тиристор $T2$. При его открытии конденсатор C разряжается (через резистор R). Так как направление тока разряда противоположно направлению основного тока I_0 , результирующий ток через тиристор $T1$ уменьшается и при его нулевом значении тиристор $T1$ закрывается (при снятом сигнале с управляющего электрода). При этом аппарат отключает цепь тока нагрузки I_0 .

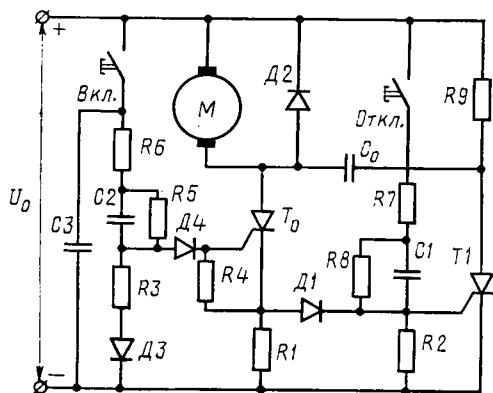


Рис. 3-74. Схема пускателя постоянного тока

Схема пускателя постоянного тока, работающего на этом принципе, дана на рис. 3-74. В нем предусмотрен узел защиты двигателя M от токов перегрузки. При нажатии кнопки *Вкл.* подается сигнал на управляющий электрод тиристора T_0 . Он открывается и двигатель M приходит во вращение. Конденсатор C_0 заряжается до напряжения U_0 через резистор R_9 . Если возникает ток перегрузки в двигателе, повышенное напряжение на резисторе $R1$ создает необходимый для открытия тиристора $T1$ ток в цепи его управляющего электрода. Тиристор $T1$ открывается, конденсатор C_0 разряжается, ток разряда идет через тиристор T_0 и результирующий ток через него снижается до нулевого значения, при котором T_0 закрывается и двигатель отключается автоматически. То же самое происходит при ручном отключении. Нажатием кнопки *Откл.* подается сигнал на открытие тиристора $T1$. Элементы схемы $D1-D4$, $C1-C3$, $R2-R9$ обеспечивают необходимые условия работы схемы.

Схема бесконтактного аппарата для управления двигателем постоянного тока, работающим на выпрямленном токе, дана на рис. 3-75, а. В мостовую схему выпрямителя включены тиристоры T , которые включают и отключают двигатель (обмотку якоря $Я$). Управление тиристорами осуществляется с помощью магнитного усилителя $MУС$ с самонасыщением. Его характеристика (рис. 3-75, б) с помощью тока в обмотке смещения $w_{см}$ смещена

вправо, и при токе управления $i_{уп} = 0$ сопротивления $X1$ и $X2$ обмоток нагрузки МУС велики и ток нагрузки $i_{нг}$ близок к нулю.

Подача сигнала $i'_{уп}$ через кнопку управления КУ на обмотку управления $w_{уп}$ открывает магнитный усилитель. Создаваемое трансформатором $Tr1$ напряжение обуславливает в цепи обмотки нагрузки $w_{нг}$ МУС существенно возросший ток $i'_{нг}$. В этом случае во вторичных обмотках разделительного трансформатора $Tr2$ наводятся ЭДС (и токи), необходимые для открытия тиристоров T . Эти ЭДС должны быть выше пороговых напряжений ($U_n \approx 1 \div 2$ В) для диодов $D1$, тогда они пропускают необходимые

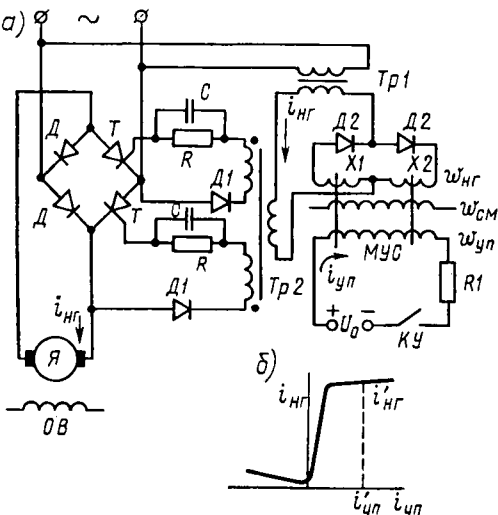


Рис. 3-75. Двухпульсная схема пу-
скаателя постоянного тока

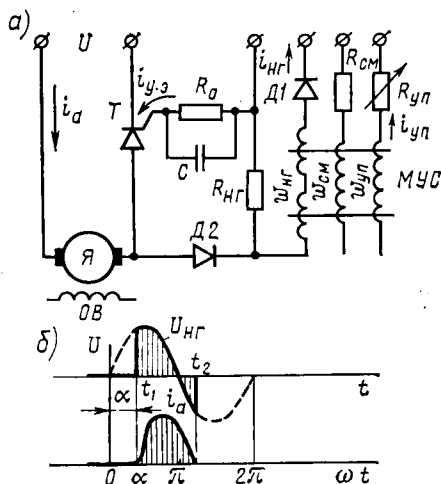


Рис. 3-76. Однопульсная схема
бесконтактного управления

для открытия тиристоров токи в цепи их управляющих электродов (при $i_y = 0$ в МУС таких ЭДС нет и диоды D запирают токи на управляющие электроды).

Таким образом, при подаче тока управления в обмотку w_y МУС тиристоры открываются и двигатель приходит во вращение. При снятии тока управления в МУС тиристоры запираются в момент перехода тока через нуль и двигатель останавливается.

Разделительный трансформатор $Tr2$ обеспечивает необходимую гальваническую развязку цепей управления тиристоров. Полярность включения его вторичных обмоток должна обеспечивать открытие одного тиристора в положительный, а другого — в отрицательный полупериод источника питания. Чтобы уменьшить влияние тока холостого хода МУС на работу схемы, магнитопровод этого трансформатора целесообразно изготовлять из материала с прямоугольной петлей гистерезиса.

Добавочные резисторы R ограничивают токи в цепи управляющих электродов. Шунтирующие емкости C способствуют уменьшению средней за полупериод мощности, рассеиваемой на этих электродах. Емкостная составляющая тока, проходящая в период продолжительности переднего фронта MUC выходного напряжения MUC , обеспечивает открытие тиристора. Резистор R является разрядным для емкости C за время управляющего полупериода магнитного усилителя.

Приведем пример построения бесконтактного аппарата, с помощью которого можно производить не только включение—отключение двигателя постоянного тока, но и регулирование его частоты вращения (рис. 3-76, а). Двигатель небольшой мощности работает на однопульсном выпрямленном токе (проходит лишь положительный полупериод тока). Тиристор T служит выпрямителем в цепи двигателя. С помощью тиристора можно также регулировать среднее значение выпрямленного тока. При отсутствии тока $i_{y.э}$ в цепи управляющего электрода тиристор закрыт и ток через его силовую цепь не проходит, двигатель не вращается. Чтобы открыть тиристор и пустить двигатель, надо подать сигнал на его управляющий электрод ($i_{y.э} > 0$).

Управление тиристором осуществляется с помощью магнитного усилителя с самонасыщением (MUC), характеристика которого (со смещением) дана на рис. 3-75, б. С помощью изменения тока управления $i_{уп}$ MUC задается тот или иной ток нагрузки $i_{нг}$ MUC , который проходит через резистор $R_{нг}$. Так как $R_{нг}$ включен в цепь управляющего электрода тиристора T , то напряжение на $R_{нг}$ и ток $i_{y.э}$ через управляющий электрод тиристора зависят от тока нагрузки $i_{нг}$ MUC , а через него — и от тока управления $i_{уп}$ MUC . Изменением тока $i_{уп}$ MUC можно регулировать угол отпирания α тиристора в пределах $\alpha = 0 \div 180^\circ$ и длительность протекания анодного тока в проводящем полупериоде. Заметим, что для отпирания тиристора необходимо на $R_{нг}$ иметь напряжение, которое превышает пороговое для диода $D2$ (1—2 В), иначе диод $D2$ будет закрыт и не пропустит ток $i_{y.э}$ через управляющий электрод тиристора.

На рис. 3-76, б изображены кривые тока i_a в цепи тиристора (и двигателя) и напряжения $U_{нг}$ на двигателе. В момент времени t_1 , соответствующий углу отпирания α , подается сигнал на управляющий электрод ($i_{y.э} > 0$). Тиристор открывается и по силовой цепи начинает проходить ток i_a . Так как двигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку, ток i_a подходит к нулевому значению позже момента перехода через нулевое значение напряжения источника. В момент времени t_2 тиристор закрывается. Если в следующие положительные полупериоды напряжения сигнал управления подается снова в момент времени t_1 , то кривые тока i_a и напряжения $U_{нг}$ такие же, какие они изображены на рис. 3-76, б. Регулируя величину угла отпирания α , можно изменить среднее значение выпрямленного тока, проходящего через двигатель. Чтобы отключить цепь, надо прекратить подачу управ-

ляющего сигнала на управляющий электрод тиристора. Тогда при первом же нулевом значении тока тиристор закрывается. Таким образом, появление сигнала на управляющем электроде тиристора соответствует включению силовой цепи, снятие этого сигнала — ее отключению, а изменение угла отпирания α приводит к уменьшению среднего значения тока через двигатель и скорости его вращения.

Если тиристоры используются для управления двигателем постоянного тока, включаемого на постоянное напряжение, то ток в силовой цепи не снижается до нуля естественным путем в определенные моменты времени и тиристор не закрывается самопроизвольно. В этом случае для отключения нагрузки применяются искусственные схемы, например, с применением конденсатора. Подключение конденсатора к схеме вызывает переходный режим в цепи, в которой ток принимает нулевое значение в определенные моменты времени. Если сигнал с управляющего электрода снят, то в эти моменты времени тиристор закрывается и силовая цепь отключается. Возможно использование других принципов отключения тириستоров, а также применение иных типов управляемых диодов, которые могут закрываться и при наличии прямого тока в анодной цепи.

На рис. 3-77 показана схема управления асинхронным двигателем с помощью бесконтактного аппарата, имеющего тиристоры T , полупроводниковые диоды D , магнитный усилитель $МУС$ и другие элементы. В каждую фазу асинхронного двигателя включена ячейка, состоящая из параллельно и встречно включенных тиристоров T и неуправляемых диодов D . Когда ток в цепи управляющих электродов тиристоров равен нулю, все три тиристора и неуправляемые диоды окажутся запертыми в течение всего периода частоты источника питания. Ток и напряжение в статорной обмотке двигателя, обусловленные токами утечки запертых диодов, близки к нулю. В этом случае силовая цепь отключена, двигатель не работает. Если на управляющие электроды тиристоров подать входные сигналы и открыть тиристоры, то ячейки из параллельно включенных элементов $T-D$ будут иметь малое сопротивление в прямом направлении. Напряжение на двигателе становится рав-

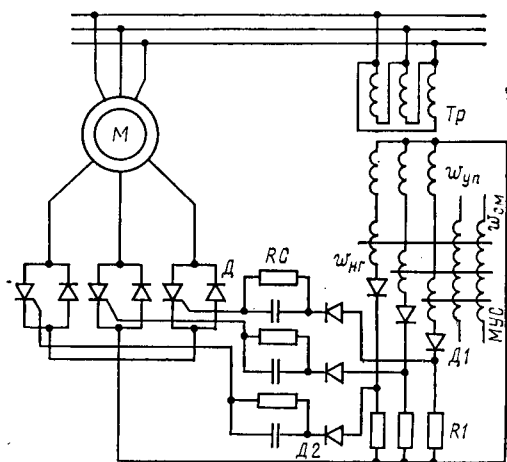
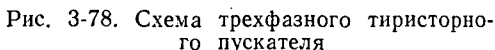


Рис. 3-77. Трехфазная схема пускателя с МУС

На рис. 3-77 показана схема управления асинхронным двигателем с помощью бесконтактного аппарата, имеющего тиристоры T , полупроводниковые диоды D , магнитный усилитель $МУС$ и другие элементы. В каждую фазу асинхронного двигателя включена ячейка, состоящая из параллельно и встречно включенных тиристоров T и неуправляемых диодов D . Когда ток в цепи управляющих электродов тиристоров равен нулю, все три тиристора и неуправляемые диоды окажутся запертыми в течение всего периода частоты источника питания. Ток и напряжение в статорной обмотке двигателя, обусловленные токами утечки запертых диодов, близки к нулю. В этом случае силовая цепь отключена, двигатель не работает. Если на управляющие электроды тиристоров подать входные сигналы и открыть тиристоры, то ячейки из параллельно включенных элементов $T-D$ будут иметь малое сопротивление в прямом направлении. Напряжение на двигателе становится рав-

Управление схемой (рис. 3-77) осуществляется от трехфазного магнитного усилителя с самоподмагничиванием. Это возможно при относительно высоком коэффициенте мощности ($\cos\varphi \approx 0,8$). Разделительный трансформатор TP обеспечивает необходимую гальваническую развязку управляемой и управляющей цепей. Если токи управления и смещения магнитного усилителя таковы, что при них создается минимальный ток в цепи нагрузки MUC , то падение напряжения резистора $R1$ ниже порогового напряжения диодов $D2$ и они практически не проводят тока. Токи в цепях управляющих электродов тиристоров равны нулю, тиристоры закрыты, двигатель отключен. Но если увеличить ток управления MUC и значительно повысить падение напряжения на сопротивлении $R1$, то в цепи управляющих электродов также появятся токи, которые вызовут отпирание тиристоров и пуск двигателя. Запирание тиристоров и останов двигателя можно достичь при обратном направлении и определенном значении тока управления

Схема *трехфазного тиристорного пускателя* без применения *МУС* для управления тиристорами дана на рис. 3-78. От вторичной обмотки трехфазного *разделительного трансформатора TP1* (с коэффициентом трансформации 1:1) напряжение поступает на *асинхронный двигатель M*, если нажать кнопку *Вкл.* и тем самым включить тиристор *TI*, пода-



172

$T1$ остается включенным, так как по нему идет выпрямленный ток. Нажатием кнопки *Откл.* осуществляется останов двигателя. Включается тиристор $T2$ и емкость $C2$ разряжается на обмотку ω_2 импульсного трансформатора $ИТ$. В цепи обмотки ω_1 (через емкость $C1$ и тиристор $T1$) начинает проходить наведенный ток, который гасит тиристор $T1$. Соединение в звезду первичных обмоток $ТР1$ нарушается и обесточенный двигатель останавливается.

При включении тиристора $T2$ схема подготавливается к следующему включению. Через тиристор $T2$ и сопротивление $R1$ заряжается емкость $C4$. Когда напряжение на ней поднимается до достаточного уровня, включается динистор $Дн$, а через него и тиристор $T3$, при этом емкость $C3$ разряжается на обмотку ω_3 импульсного трансформатора $ИТ$. В обмотке ω_2 возникает трансформированный импульс, который замыкается через емкость $C2$ и гасит тиристор $T2$, при отключении которого разрывается анодная цепь тиристора $T3$. Схема пускателя подготовлена для следующего включения двигателя.

В табл. 3-8 даны технические параметры некоторых отечественных тиристорных пускателей.

Таблица 3-8

Тип пускателя	$U_{ном}$, В	Число фаз	$I_{ном}$, А	$I_{пред}$, А	Напряжение цепи управления, В	Время цикла включения — отключение, мс	Назначение
ПТ-16	380	3	50	560	24	—	Включение, отключение и реверс асинхронных двигателей
ПТУ-100	380	3	100	1700	65	20	Коммутация асинхронных двигателей, защита от сверхтоков и понижения напряжения
ПТУ-63	380	5	63	1700	24	—	То же

§ 3-14. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ СЕРИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОНТАКТОРОВ И ПУСКАТЕЛЕЙ

В настоящее время широко применяются контакторы поворотного типа серий КТ-6000 (с щелевыми камерами и магнитным дутьем) и КТ-7000 (с дугогасительными решетками), предназначенные для коммутации переменного тока. Конструктивная схема этих аппаратов показана на рис. 3-79. Контактторы представляют собой моноблочную конструкцию. Блоки укрепляются на металлической рейке 14, на которой крепятся опоры подшипников 5 для главного вала 6. Вал сделан из стали, а его наружная поверхность покрыта достаточно толстым изоляционным слоем 8. На валу 6 установлены подвижные контакты 11 с контактнымипру-

жинами 13 и гибкими связями 7 (три полюса), подвижная часть системы блок-контактов 1 и якорь втягивающего электромагнита 4. На рейке 14 крепятся узлы неподвижных контактов 12 вместе с системами последовательного магнитного дутья (обмотка 10, сердечник 9, боковые стальные пластины 2) и дугогасительные камеры 3. На той же рейке установлены сердечник втягивающего П-образного электромагнита с обмоткой и неподвижная часть системы блок-контактов 1. Эти контакторы используются в сетях напряжением до 660 В при тяжелом режиме работы, когда требуются частые пуски электродвигателей (металлургические, крановые и другие установки).

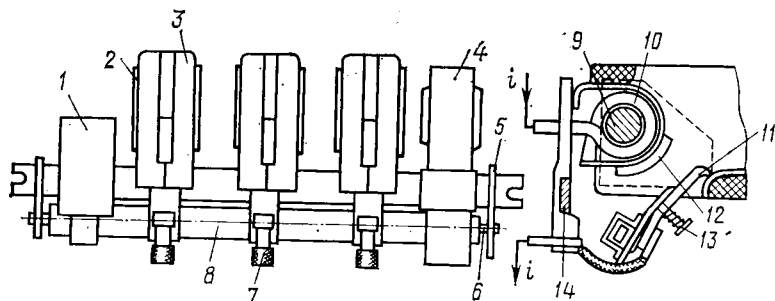


Рис. 3-79. Конструктивная схема контактора серии КТ

Контакторы КТ-6000 выпускаются на напряжения 380 и 660 В, номинальные токи — 100, 160, 250, 400, 630 и 1000 А, число полюсов — 2, 3, 4 и 5, допустимая частота включений 1200 1/ч. Контакторы КТ-7000 допускают частоту циклов 600 1/ч. Механическая износостойкость контакторов КТ-6000 и КТ-7000 составляет $(5-15)10^6$ срабатываний. Допустимые токи в разных режимах работы некоторых контакторов КТ-6000 даны в табл. 3-9. Временные и токовые параметры электромагнитных приводов контакторов КТ-6000 и КТ-7000 даны в табл. 3-10.

Таблица 3-9

Тип контактора	Допустимые токи			
	продолжи- тельный режим, А	пере- мещающийся режим, А	повторно-кратковременный режим ($IPIB=40\%$, $Z=600$ 1/ч)	
			ток включения при номинальном напряжении, А	ток отключения при 0,17 $U_{ном}$, А
КТ-6014	60	80	480	80
КТ-6024	75	100	600	100
КТ-6022	120	180	900	160
КТ-6032	165	280	1500	250
КТ-6042	300	400	2700	400
КТ-6052	470	630	3800	630

Контакторы	Номинальный ток, А	Ток в обмотке, А				Время, с	
		рабочий при напряжении, В		пусковой при напряжении, В		срабатывания	отпускания
		220	380	220	380		
КТ-6000	100	0,21	0,14	2,1	1,4	0,04	0,02
	160	0,21	0,14	2,1	1,4	0,04	0,02
	250	0,72	0,44	7,2	4,4	0,04	0,012
	400	0,98	0,7	9,8	9,8	0,05	0,02
	630	1,65	0,98	16,5	9,8	0,05	0,02
КТ-7000	100	0,26	0,12	3,7	1,8	0,034	0,015
	160	0,26	0,12	3,9	1,8	0,03	0,01

Примечание. Контакторы на 100—160 А имеют мощность обмотки 25 Вт, число витков w и диаметр провода d при напряжениях: 220 В — $w=1430$, $d=0,35$ мм; при 380 В — $w=2470$, $d=0,27$ мм.

На рис. 3-80 изображена конструктивная схема контакторов постоянного и переменного токов серий КН и КНУ. Все элементы контактора установлены на скобе магнитопровода 1. Уравновешенная поворотная подвижная система состоит из якоря 3, траверсы 4, на которой устанавливаются подвижные контактные мостики 8 с контактными пружинами 9 и рычага 11. На траверсе установлены подвижные контакты узла блок-контактов 10. Детали подвижной системы образуют параллелограмм, уравновешенный в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, параллельных осям вращения O_1 , O_2 и O_3 .

Включение осуществляется при подаче напряжения на обмотку 2, отключение — за счет возвратной пружины, воздействующей на рычаг 11. Контакторы этих серий имеют мостиковые контакты 5 и 8 и двукратные разрывы на полюс, обеспечивающие благоприятные условия гашения дуги. Дуга постоянного тока в контакторах гасится с по-

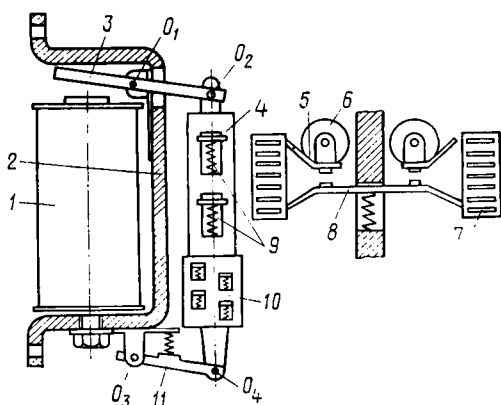


Рис. 3-80. Конструктивная схема контактора серии КН

за счет возвратной пружины, воздействующей на рычаг 11. Контакторы этих серий имеют мостиковые контакты 5 и 8 и двукратные разрывы на полюс, обеспечивающие благоприятные условия гашения дуги. Дуга постоянного тока в контакторах гасится с по-

мощью системы последовательного магнитного дутья (катушка 6) и щелевых камер, снабженных на выходе пламягасительными решетками 7.

Допустимая частота срабатываний для контакторов серии КН — до 1200 1/ч, относительная продолжительность включения ПВ=40%, механическая износостойкость до $1,5 \cdot 10^6$. Технические параметры контакторов серии КН и КНУ на разные номинальные токи таковы:

Номинальный ток, А	25	100	200	400
Нажатие в контактах (на мостик), Н . .	5,5	20	40	80
Провал контактов, мм	1	2	2	3
Предельный ток включения, А	250	1000	2000	4000
Длительный ток вспомогательных контактов, А	7	7	7	7

Числа витков обмотки:

при напряжении 110 В	14 000	12 500	12 000	10 000
при диаметре провода, мм	0,18	0,23	0,22	0,27
при напряжении 220 В	30 000	20 000	20 000	10 000
при диаметре провода, мм	0,12	0,14	0,2	0,27

Существуют контакторы с остаточной намагниченностью магнитопровода в его приводе, за счет которой они удерживаются во включенном состоянии, когда тока в управляющей обмотке нет. Магнитопроводы изготовляют из материалов, по магнитным свойствам, близким к магнитно-твердым со сравнительно большой коэрцитивной силой и остаточной индукцией (хромистые и малоуглеродистые стали). Отечественные серии таких контакторов (КМЗ-О и КМЗ-ОТ) выполнены на базе пускателей ПМЕ-071, имеющих прямоходовую магнитную систему.

На рис. 3-81 изображена электрическая схема этих аппаратов. При нажатии кнопки *Вкл.* втягивающая обмотка обтекается выпрямленным током через выпрямительный мост *В* и вспомогательные контакты *1*. После размыкания *1* обмотки ω_1 подпитываются током, заряжающим конденсатор *С*. Значение тока и длительность заряда выбраны так, что они обеспечивают четкое включение и замыкание контактора. Остаточный поток удерживает аппарат во включенном положении.

Для отключения нажимается кнопка *Откл.* Ток проходит через резистор R_1 , контакты *2*, выпрямитель *В* и обмотку ω_2 , магнитный поток от которой размагничивает магнитную систему; аппарат отключается. Конденсатор разряжается на резистор R_2 , после чего аппарат готов к следующему включению. Главные контакты *ГК* коммутируют цепь основного тока.

Среди отечественных пускателей наиболее распространены серии ПМЕ, ПМА и ПАЕ. Пускатели серии ПМЕ предназначены

для управления двигателями небольшой мощности. Они имеют прямоходовую подвижную систему (рис. 3-82). На основании 9 устанавливается магнитопровод 1 с обмоткой управления 3. В отключенном состоянии якорь 8 силами пружин 2 переведен в крайнее правое положение. Связанные с якорем подвижные контакты 5 замыкаются с неподвижными контактами 4, когда подано напряжение на обмотку 3, и якорь 8 притягивается к магнитопроводу 1. Сила нажатия в контактах создается плоской пружиной 6, опирающейся на выступ детали 7.

Пускатели серии ПМЕ работают на напряжении 380 и 500 В; напряжения обмотки управления — от 24 до 500 В. Они допускают частоту срабатывания до 1200 1/ч. Время их включения составляет 10—25 мс. Технические данные ПМЕ даны в табл. 3-11.

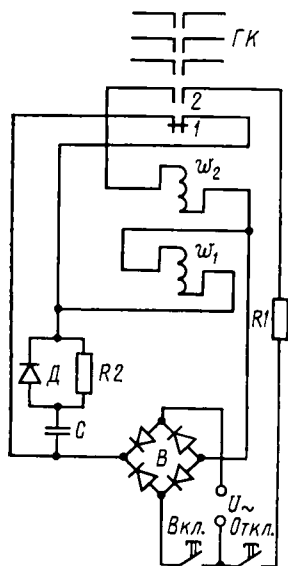


Рис. 3-81. Схема управления контакторов КМЗ

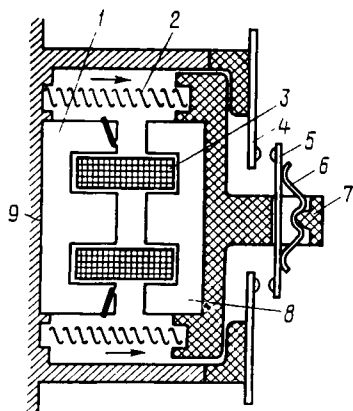


Рис. 3-82. Устройство прямоходового пускателя

Пускатели серии ПАЕ имеют подвижную систему поворотного типа (рис. 3-83). Пускатель собирается на металлическом основании 1. Неподвижные контакты 2 помещены внутри изоляционных камер, образованных стенками 6. Токоведущие части у неподвижных контактов имеют петлеобразную форму, чтобы увеличить электродинамические усилия и исключить образование «стоячей» дуги между контактами. Опорные точки дуги не остаются неподвижными на поверхности контактов, что приводит к увеличению восстанавливающей прочности. Подвижные контакты 8 мостикового типа установлены на детали 11. Нажатие в контактах, укрепленных в головке 10, осуществляется контактными пружинами 9. Двукратный разрыв цепи улучшает условия гашения дуги.

Якорь втягивающего электромагнита пускателя серии ПАЕ устанавливается на детали 11. Неподвижный магнитопровод 4

Марки пускателей

Параметры	ПМЕ-100	ПМЕ-100	ПМЕ-200	ПАЕ-300	ПАЕ-400	ПАЕ-500	ПАЕ-600
Номинальный ток при напряжении 380/500 В, А	3/1,5	10/6	25/14	40/21	63/35	110/61	146/80
Предельный включаемый и отключаемый ток при напряжении 380 В и $\cos \varphi = 0,4$	30	100	280	400	630	100	1500
Провал главных контактов, мм	$2,4 \pm 0,4$	$2,5 \pm 0,5$	$3 \pm 0,5$	$2,2 \pm 0,5$	$3,5 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$	$4 \pm 0,5$
Начальное нажатие на контактный мостик, Н	1,1	2,0	4,6	13	18	33	50
Раствор главных контактов, мм	2,8	2,5	3	3	3,5	3,5	4
Материал контактной накладки	Серебро	Металлокерамика марки КМК-А30	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10	КМК-А10
Номинальная мощность обмотки, Вт	3,6	6	8	17	20	26	38
Пусковая мощность, потребляемая обмоткой, Вт	65	130	160	260	465	800	3400
Тепловое реле	—	—	ТРН-25	ТРН-40	ТРП-60	ТРП-150	ТРП-160
Коммутационная износостойкость	$2,5 \cdot 10^6$	—	$2,5 \cdot 10^6$	10^6	10^6	10^6	10^6
Механическая износостойкость	$16 \cdot 10^6$	—	$16 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	10^7	10^7

электромагнита с обмоткой 5 установлен на амортизирующих пружинах 3. Известно, что ток, проходящий через обмотку электромагнита переменного тока, растет с увеличением воздушного зазора (при неизменном напряжении), так как при этом уменьшается индуктивное сопротивление обмотки электромагнита. Поэтому при относительно большом воздушном зазоре в электромагнитах пускателей серии ПАЕ создается необходимая сила для надежного притяжения якоря при включении. Во включенном состоянии, когда величина воздушного зазора резко сокращается (0,3—0,5 мм), индуктивное сопротивление увеличивается, что приводит к умень-

шению тока в обмотке и ее мощности. Подвижная система пускателя возвращается в отключенное положение за счет массы этой системы и пружины 7.

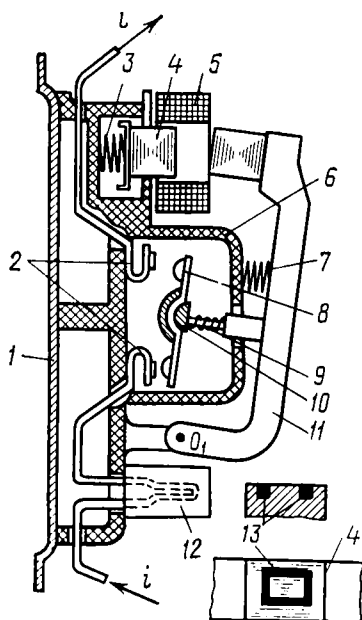


Рис. 3-83. Конструктивная схема пускателя ПАЕ

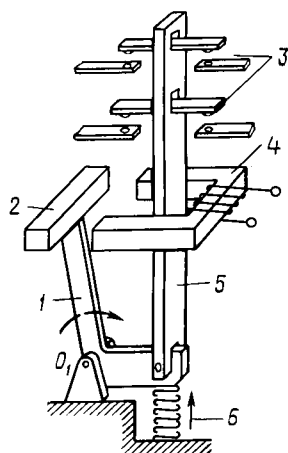


Рис. 3-84. Схема конструкции пускателей ПМА

В пускателях серии ПАЕ найдена удачная конструкция короткозамкнутого витка 13, устанавливаемого на полюсе 4 втягивающего электромагнита для устранения вибраций якоря. Дюралюминиевая рамка плотно впрессовывается в прямоугольный паз на конце полюса. Такая конструкция короткозамкнутого витка оказывается достаточно надежной в условиях эксплуатации. В пускатели встраивается тепловое реле 12. Пускатели ПАЕ предназначены для управления трехфазными двигателями с короткозамкнутым ротором мощностью 17—75 кВт при напряжении 380 и 500 В. Ниже приведены обмоточные данные пускателей ПАЕ и их технические параметры на разные номинальные токи:

Номинальный ток, А	—	40	63	120	146
Диаметр провода (мм) при напряжении, В	127	0,29	0,47	0,64	0,83
	220	0,23	0,35	0,49	0,62
	380	0,17	0,27	0,35	0,47
	500	0,15	0,23	0,31	0,41
Число витков при напряжении, В	127	1400	920	700	516
	220	2400	1600	1200	890
	380	4150	2760	2070	1540
	500	5450	3640	2730	2020

Принцип устройства пускателей ПМА показан на рис. 3-84. При подаче напряжения на обмотку управления, расположенную на магнитопроводе 4, якорь 2 притягивается к полюсам. Рычаг 1 поворачивается вокруг оси O_1 , и перемещение вниз тяги 5 приводит к замыканию контактных мостиков 3. При снятии напряжения с обмотки управления возвратная пружина 6 переводит подвижную систему в отключенное состояние. Дугогасительные решетки, расположенные у контактов 3, осуществляют гашение дуги при отключении тока.

Пускатели ПМА имеют много различных исполнений: открытое, защищенное от воздействия окружающей среды, реверсивные, не-

реверсивные, реверсивные с электрической или механической блокировкой (предотвращают возможность одновременного включения контактных систем вперед и назад), с кнопками управления и без них, для внутрисоюзных и экспортных поставок и т. д. Обмотки управления пускателем выпускаются на напряжения 24, 48, 110 и 220 В постоянного тока и 24, 42, 36, 110, 127, 220, 380, 660 В переменного тока. Допустимая частота включений при относительной продолжительности включения ПВ 40% составляет 600 1/ч. Основные техниче-

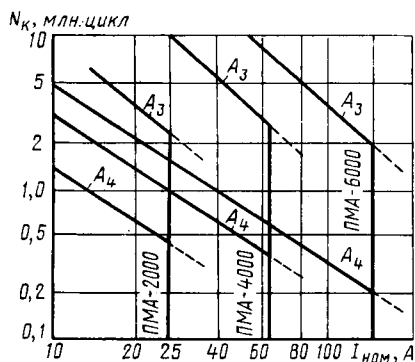


Рис. 3-85. Коммутационная износостойкость пускателей ПМА в режимах работы A_3 и A_4

ские параметры пускателей ПМА приведены в табл. 3-12

Коммутационная износостойкость аппаратов зависит от отключаемого тока. Соответствующая зависимость для пускателей ПМА с номинальными токами 25, 60 и 160 А показана на рис. 3-85. Зависимости приведены для регламентированных режимов A_3 и A_4 (см. § 3-1).

Номинальный ток, А	Мощность управляемого двигателя (кВт) при напряжении, В				Номинальный ток контактов пускателя в защищенном исполнении (А) при напряжении, В		
	220	380	500	660	380	500	660
25	5,5	11	15	17,5	23	23	10
40	11	18,5	22	18,5	36	36	25
63	18,5	30	45	37	60	60	40
100	30	55	75	55	95	95	63
160	45	75	110	90	150	150	100

Примечание. Для пускателей открытого исполнения номинальный ток контактов равен номинальному току контактора.

§ 3-15. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА КОНТАКТОРА

При расчете контактора обычно задают номинальный ток $I_{ном}$, предельный отключаемый ток $I_o = (7 \div 10) I_{ном}$, номинальное напряжение $U_{ном}$, относительную продолжительность включения ПВ % и частоту циклов z в час. Проводится расчет в следующем порядке:

1. Определяется сечение токоведущих частей аппарата в режиме номинального тока $I_{ном}$ с учетом того, чтобы установившаяся температура нагрева частей не превышала допустимую температуру для изоляции, с которой соприкасаются токоведущие части (см. табл. 1-1). Для расчетов можно использовать зависимости, приведенные в § 1-3. Необходимо учитывать наличие тепловых барьеров в схемах теплопередачи от токоведущих частей (дугогасительные камеры, изоляционные детали, катушки и т. д.). Может оказаться, что влияние теплопередачи от токоведущих частей через стенки камер будет в несколько раз меньше по сравнению с теплоотводом вдоль токоведущих частей за счет теплопроводности металла.

Температура токоведущих частей и контактов аппарата может повыситься за счет нагрева контактов электрической дугой при отключении цепи. Эквивалентный ток $I_{экр}$, который вызывает тот же нагрев токоведущих частей, что и отключаемый ток $I_{ном}$ при длительном протекании с нагревом частей электрической дугой для контакторов, коммутирующих цепи электродвигателей, можно определить по эмпирической формуле

$$I_{экр} = I_{ном} \sqrt{(ПВ) \% / 100 + (z, 600) \sqrt{ПВ \% / 100}}.$$

2. Определяется сечение токоведущих частей в режиме тока перегрузки или тока короткого замыкания. Этот режим полагается адиабатическим (без отдачи теплоты в окружающую среду). Определяется совокупность трех основных параметров — тока $I_{кз}$, времени его протекания t_k , называемого временем термической устойчивости, и сечения токоведущих частей. Совокупность этих трех величин должна быть выбрана так, чтобы температура нагрева токоведущих частей не превышала допустимую для кратковременного режима (см. табл. 1-4).

Наибольшее из двух сечений (в режимах номинального тока и сверхтока) принимается за расчетное сечение токоведущих частей проектируемого контактора.

3. Рассчитывается сила контактного нажатия P_k в длительном режиме номинального тока. Эта сила должна быть такой, чтобы определяемое ею переходное сопротивление контактов R_k не приводило к большим тепловым поте-

рям в контактной точке и чтобы температура нагрева этой точки не превышала допустимую (см. § 1-5). В некоторых условиях допустимую температуру нагрева контактных точек можно принимать более высокой, не превышающей, однако, температуры рекристаллизации материала контакта. Для расчетов пригодны зависимости, приведенные в § 1-5.

4. Рассчитывается сила контактного нажатия из условия, чтобы в режиме сверхтока электродинамические силы отталкивания в контактах не вызывали их расхождения и образования дуги в межконтактном промежутке. Сила контактного нажатия должна обеспечивать отсутствие приваривания контактов. Для расчетов можно использовать зависимости, приведенные в § 1-5.

Расчетная сила контактного нажатия равна наибольшему из полученных значений при расчете по п. 3 и 4. По ней определяются параметры контактных пружин, которые должны иметь предварительное сжатие, развиваемое пружиной в первый момент касания контактов. Важно, чтобы сила предварительного нажатия контактов была не меньше расчетной силы контактов нажатия. В конце расчета контактора сила предварительного нажатия контактов и параметры контактных пружин проверяются по допустимой вибрации контактов.

5. Определяется раствор контактов исходя из условий гашения дуги при малых токах. Для расчета раствора контактора постоянного тока можно использовать зависимость (3-22), которая дает завышенные величины критической длины дуги $l_{кр}$, так как не учтено приэлектродное падение напряжения в дуге. Одновременно с расчетом $l_{кр}$ для разных значений тока определяется скорость движения дуги. Раствор контактов можно выбирать равным расчетному значению $l_{кр}$ для тока, при котором скорость движения дуги обеспечивает выход дуги из межконтактного промежутка за время 0,01—0,02 с. Этот ток называется *критическим током*.

6. Рассчитываются параметры дугогасительной системы и системы магнитного дутья, при которых обеспечивается надежное гашение дуги за время не более 0,1 с в диапазоне токов от критического до предельно отключаемого. Принципы, положенные в основу расчета дугогасительных систем постоянного и переменного токов, и основные зависимости изложены в § 3-5 и 3-6.

7. Рассчитывается необходимая наружная поверхность дугогасительной камеры из условий ее допустимого нагрева. Для расчета пригодна зависимость (3-30).

8. Используя зависимости, приведенные в § 3-7, рассчитывается износ контактов контактора при номинальном токе $I_{ном}$ и заданной электрической износоустойчивости $N_{эл}$. Этим расчетом определяется объем материала контактов, который выгорит при $N_{эл}$ коммутациях цепи, и в конечном результате — линейный износ контактов. Линейный износ контактов σ_d позволяет выбрать необходимое значение провала контактов, примерно равное $2,5\sigma_d$. При наличии такого провала контактов даже изношенные контакты создают надежное замыкание коммутируемой цепи.

9. По найденным величинам строится ориентировочная характеристика противодействующих сил, приведенных к контактам (рис. 3-86, а). По оси абсцисс отложены расчетные значения раствора и провала контактов. Под $P_{ко}$ подразумевается сила предварительного сжатия контактных пружин всех полюсов контактора, отнесенная к месту соприкосновения контактов. Силу конечного сжатия контактных пружин $P_{кн}$ рассчитывают, исходя из «постоянной» пружины и ее сжатия, соответствующего провалу контактов. Если теперь по кинематической схеме проектируемого контактора построить новую характеристику, приведенную к воздушному зазору втягивающего электромагнита, с учетом противодействующих сил, создаваемых возвратной пружиной и массой подвижной системы контактора, то получим необходимые данные для выбора и расчета параметров тягового электромагнита (3-86, б). Площадь S_1 на этой характеристике определяется массой подвижных частей и силой противодействующей пружины, умноженными на приведенный ход контактора, а площадь S_2 силами контактных пружин, умноженными на приведенный провал контактов.

По известной силе $P_{кр}$ при критическом зазоре $\delta_{кр}$, который соответствует моменту касания контактов, находя силу электромагнита $P_{э.кр}$, которую он должен развивать при критическом зазоре $P_{э.кр} = K_3 P_{кр}$, где $K_3 = 1,2 \div 1,5$ — коэффициент запаса.

Через точку $P_{в.кр}$ проводим пунктиром примерную тяговую характеристику электромагнита $P_{эм} = f(\delta)$ и в соответствии с рекомендациями, изложенными в § 3-8, выбираем тип тягового электромагнита, а затем и конструктивные размеры его магнитопровода. Если воздушный зазор $\delta_{кр}$ невелик по сравнению с размерами магнитопровода и полюса электромагнита, поле в воздушном зазоре предварительно можно считать равномерным. При выбранной индукции B_δ в воздушном зазоре можно оценить размеры поперечного сечения электромагнита, используя формулу Максвелла для тяговой силы, из которой $S = 2\mu_0 P_{эм} / B_\delta^2$, где S — сечение полюса, м²; $P_{эм}$ — электромагнитная сила, Н; B_δ — индукция в зазоре, Тл (0,5 — 0,7 Тл); $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

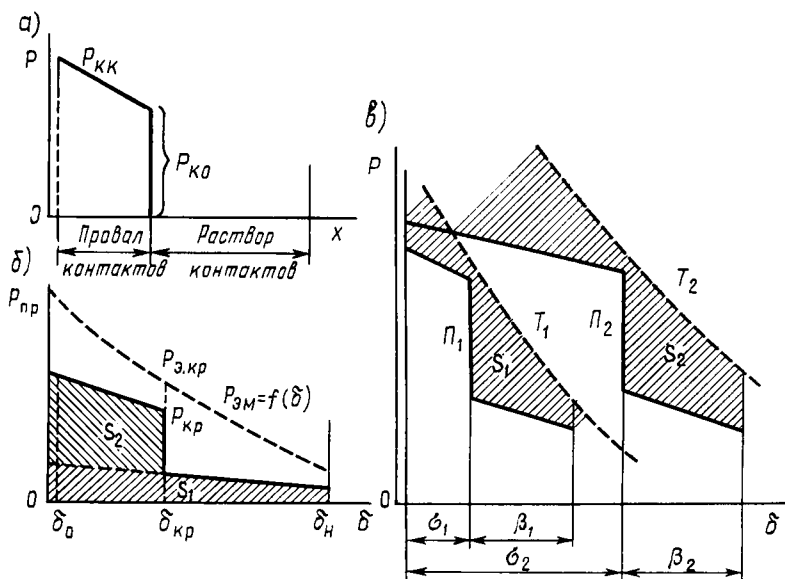


Рис. 3-86. Противодействующие характеристики контактора

Зная величину S , можно выбрать остальные размеры электромагнита, используя установившиеся в конструкторской практике соотношения между ними. Расчет электромагнита включает в себя определение магнитных проводимостей воздушных зазоров, нахождение потоков в воздушном зазоре при разной его величине и соответствующих им тяговых усилий, построение статической тяговой характеристики при номинальных (для номинального напряжения $U_{ном}$) и минимальных ($0,85 U_{ном}$) магнитодвижущих силах катушки, а также расчет катушки электромагнита с учетом допустимого ее нагрева. При необходимости определяется время срабатывания электромагнита.

На рис. 3-86, б) приведены два варианта характеристики противодействующих сил контактора — Π_1 и Π_2 . Допустим, что эти характеристики получены при проектировании и расчете контактора на одни и те же исходные данные. Очевидно, что наиболее рациональной является характеристика Π_1 с меньшей величиной провала σ_1 и раствора β_1 контактов. Соответствующая ей тяговая характеристика T_1 может быть обеспечена электромагнитом сравнительно больших габаритов и мощности. Избыточная энергия, определяемая площадью S_1 между тяговой T_1 и противодействующей Π_1 характеристиками в интервале изменения воздушного зазора, при этом сравнительно невелика. Следовательно,

вибрация контактов в таком контакторе небольшая. Наоборот, для преодоления противодействующих сил, определяемых характеристикой Π_2 , надо иметь более мощный электромагнит, которому соответствует тяговая характеристика T_2 . Площадь S_2 на графике, заключенная между этими характеристиками в интервале хода якоря электромагнита, получается большой. Поэтому вибрация контактов может оказаться достаточно продолжительной. Таким образом, при проектировании контактора следует стремиться прежде всего к сокращению провала и раствора его контактов до допустимых значений. В этом случае сокращаются габариты контактора в целом и уменьшается избыточная энергия электромагнита, что приводит к повышению электрической и механической износоустойчивости контактора.

Пример расчета элементов контактора постоянного тока. Исходные данные для расчета: номинальный ток $I_{\text{ном}} = 40$ А, предельный отключаемый ток $I_{\text{пред}} = 10 I_{\text{ном}}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В (ПВ% $\rightarrow 100$, $z \rightarrow 0$).

Рассчитываем токоведущие части и контакты контактора.

1. Оценим размеры поперечного сечения токоведущих частей по номинальному току. Используем в контакторе изоляционные детали, соответствующие классу нагревостойкости А (см. табл. 1-1), для которого допустимая температура в длительном режиме $T_{\text{доп}} = 105^\circ\text{C}$. Для медных токоведущих деталей $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-6}$ Ом $\cdot$ см, $\alpha = 0,004$ 1/град. Примем температуру окружающей среды $T_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$, а коэффициент теплопередачи $K_T = 8 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см² $\cdot$ град).

Для проводников прямоугольного сечения по (1-25)

$$ab(a+b) = \frac{\rho_0(1+\alpha T)I_{\text{ном}}^2}{2K_T(T-T_{\text{окр}})} = \frac{1,75 \cdot 10^{-6}(1+0,004 \cdot 105)40^2}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}(105-40)} = 0,035.$$

Здесь принято $\rho_{\text{экв}} = \rho_0$.

Приняв толщину шины $a = 0,2$ см, определим ширину шины $b = 0,33$ см. Из конструктивных соображений, а также учитывая ухудшенные за счет тепловых барьеров условия теплоотвода в реальном контакторе, примем $b = 0,45$ см. Тогда поперечное сечение $S = 0,2 \cdot 0,45 = 0,09$ см² = 9 мм². Плотность тока $j_{\text{ном}} = 40/9 = 4,45$ А/мм². Для принятых размеров поперечного сечения температура нагрева токоведущих частей

$$T = T_{\text{окр}} + \frac{\rho_0(1+\alpha T)I_{\text{ном}}^2}{K_T S p} = 40 + \frac{1,75 \cdot 10^{-6}(1+0,004 \cdot 105)40^2}{8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,2 \cdot 0,45(0,2+0,45)^2} = 82^\circ\text{C}.$$

2. По (1-39) рассчитываем термическую устойчивость токоведущих частей найденного поперечного сечения:

$$I_{\text{т.с}}^2 t_{\text{т.с}} = \frac{\gamma_c S^2 \ln[(1+\alpha T_{\text{к.з}})(1+\alpha T_{\text{н}})]}{\rho_0 \alpha} = \\ = \frac{0,092 \cdot 8,9 \cdot 0,39 \ln[(1+0,004 \cdot 300)(1+0,004 \cdot 105)]}{1,75 \cdot 10^{-6} \cdot 0,004} = 18 \cdot 10^5 \text{ А}^2\text{с}.$$

Допустимая температура $T_{\text{к.з}}$ в режиме короткого замыкания найдена по табл. 1-4 ($T_{\text{к.з}} = 300^\circ\text{C}$). Токи термической устойчивости при различных значениях времени термической стойкости

$$I_{\text{т.с}} = \sqrt{18 \cdot 10^5 / t_{\text{т.с}}}.$$

Для $t_{\text{т.с}} = 0,5$ с ток $I_{\text{т.с}} = 1900$ А, для $t_{\text{т.с}} = 1,0$ $I_{\text{т.с}} = 1340$, для $t_{\text{т.с}} = 5$ $I_{\text{т.с}} = 600$, для $t_{\text{т.с}} = 10$ $I_{\text{т.с}} = 425$ А.

Следовательно, предельный отключаемый ток контактора $I_{\text{пред}} = 10 I_{\text{ном}} = 400$ А может проходить по его токоведущим частям в течение времени, которое больше 10 с (точнее $t_{\text{т.с}} = 11,3$ с).

3. Задавись, согласно § 1-5, силой удельного нажатия в контактах на основе серебра $P_{\text{уд}} = 0,1$ Н/А для $I_{\text{ном}} = 40$ А находим необходимое контакт-

ное нажатие: $P_k = P_{уд} I_{ном} = 0,1 \cdot 40 = 4$ Н. Расчет P_k можно выполнить более точно по зависимостям, изложенным в § 1-5.

4. Рассчитываем ток сваривания контактов по (1-66) — на основе серебра

$$I_{св} = \sqrt{\frac{32\lambda(T_{пл} - T_{к.д}) n P_k}{\pi \rho \sigma_{см}}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 4,18 (960 - 82) 1,4}{3,14 \cdot 1,65 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 300}} = 1630 \text{ А.}$$

При десятикратном токе контакты не привариваются, так как найденное значение тока сваривания (1630 А) превышает десятикратный по отношению к номинальному току ($10 I_{ном} = 400$ А). Сквозной ток короткого замыкания для данного контактора не должен превышать 1630 А. Согласно расчетным данным п. 2, он может проходить по токоведущим частям лишь в пределах времени $t_{т.с} \leq 0,5 \div 1,0$ с.

5. Дополнительно проверяем силу электродинамического отталкивания в контактах. Находим сначала площадь сжатия в контакте: $S_0 = P_k / \sigma_{см} = 4 / 30 \cdot 300 = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$; тогда по (1-61):

$$P_{э.д.у} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_{уд}^2 \ln \frac{S}{S_0} = \frac{1,25 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3,14} 400^2 \ln \frac{0,09}{1,32 \cdot 10^{-4}} = 0,4 \text{ Н.}$$

Принятая сила нажатия $P_k = 4$ Н больше величины $P_{э.д.у} = 0,4$ Н, поэтому контакты не будут самопроизвольно расходиться под действием электродинамических сил. Затем рассчитываются параметры контактной пружины из условия обеспечения принятой силы нажатия в контактах $P_k = 4$ Н.

Рассчитываем дугогасительную систему. Расчет обычно проводится из условия надежного гашения дуги во всем заданном диапазоне отключаемых токов, начиная от малых (~ 5 А) и до предельных ($10 I_{ном} = 400$ А).

1. Определяем возможность гашения дуги в заданных условиях без применения специальных дугогасительных устройств (открытых разрывом). По выражению (3-22) определяем критическую длину дуги при малых токах. Для тока $I = 5$ А $l_k = 0,42 \cdot 10^{-2} U_0 \sqrt{I_0} = 0,42 \cdot 10^{-2} \cdot 220 \sqrt{5} = 2,08$ см. Если разорвать контакты взять равным расчетному значению $l_{кр}$, то он обеспечит гашение дуги лишь при токах $I_0 \leq 5$ А. Для гашения дуги при токах $I_0 > 5$ А надо применять специальные меры, способствующие выходу дуги из просвета между контактами.

2. Используя зависимость (3-23) для всего диапазона отключаемых токов, найдем критические значения длины дуги при гашении ее открытым разрывом. При $I_0 < 200$ А скорость движения дуги по (3-11) $v_d = 2,12 I_d / \sqrt{\beta}$, при $\beta = 2$ см $v_d = 2,12 I_d / \sqrt{2} = 1,5 I_d$ см/с; при $I_0 > 200$ А по (3-10) $v_d = 37 \sqrt[3]{I_d}$.

3. Теперь в формулу (3-23) $U_d = I_d (92 + 0,092 v_d) / \sqrt{I_d}$ подставляем найденную для данного тока I_0 скорость v_d . Задаваясь какой-либо определенной длиной дуги l_d , рассчитываем при этих условиях ($l_d = \text{const}$, $v_d = \text{const}$) зависимость $U_d = f(I_d)$ в диапазоне токов от нуля до I_0 . Эта расчетная зависимость наносится на график и сопоставляется с реостатной характеристикой цепи. Расчетная критическая длина дуги $l_{кр}$ соответствует условиям, когда эти характеристики касаются друг с другом в одной точке. Для этого обычно необходимо провести расчет при нескольких величинах l_d .

На рис. 3-87 в качестве примера нанесены реостатная характеристика цепи при отключаемом токе $I_0 = 400$ А (прямая $U_0 - I_0$) и три расчетные вольтам-

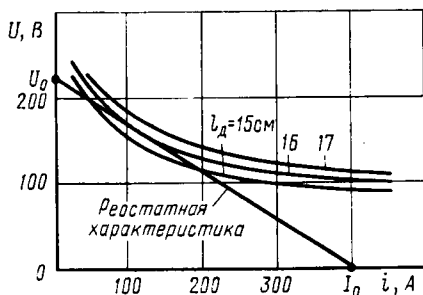


Рис. 3-87. Расчет критической длины дуги

перные характеристики дуги при длинах дуги $l_d = 15, 16$ и 17 см. Как видно из построения, при $I_0 = 400$ А расчетная критическая длина дуги $l_d \approx 16$ см. Ниже даны расчетные значения $l_{кр}$ для всего диапазона отключаемых токов I_0 :

I_0 , А	5	25	40	100	400
v_d , см/с	0	38	60	150	272
$l_{кр}$, см	2,08	4,2	5,3	8	16
t'_2 , с	0,0278	0,031	0,027	0,0175	0,0196
t''_2 , с	0,0138	0,0155	0,0135	0,00875	0,0098

4. Если в проектируемом контакторе применить два разрыва, то критическая длина дуги на одном разрыве при предельном токе $I_{пред} = 400$ А будет равна $l_{кр} = 16/2 = 8$ см. Такие дуги занимают небольшой объем. Поэтому допустимо ограничиться дугогасительным устройством со свободной дугой, применив лишь асбестоцементные перегородки для предотвращения перекрытий дуг на соседних разрывах.

5. Находим время t_r растяжения дуги до критической длины при разных значениях отключаемых токов. Допустим, что форма дуги соответствует модели рис. 3-19, для которой длина дуги $l_d \approx \sqrt{\beta^2 + 9v_d^2 t^2}$.

Так как $\beta = v_p t$, то время достижения критической длины дуги $l_{кр}$ составляет $t'_r = 16/\sqrt{v_p^2 + 9v_d^2}$.

Задаемся скоростью расхождения контактов $v_p = 75$ см/с. Для тока $I_0 = 400$ А время $t'_r = 16/\sqrt{75^2 + 9 \cdot 272^2} = 0,0196$ с.

Время растяжения дуги до длины $l_{кр}$ при двух разрывах в контакторе $t''_r = t'_r/2$. Расчетные значения t'_r и t''_r для различных токов приведены выше (п. 3).

6. Если критическая длина дуги и время ее растяжения недопустимо высоки ($t_r > 0,1$ с, $t_{кр} > 30$ см), то для повышения интенсивности дугогашения надо применить щелевую камеру с магнитным дутьем. Последовательность расчетов та же. Следует прежде всего задаться параметрами системы магнитного дутья (число витков w , сечение магнитопровода, воздушный зазор Δ) и для различных значений отключаемых токов рассчитать напряженность поля H в воздушном зазоре. Так как при гашении дуги ток уменьшается от I_0 до нуля, то при расчете величины H для отключаемого тока I_0 магнитодвижущую силу катушки допустимо взять равной $I_0 w/2$. Для того или иного отключаемого тока I_0 по соответствующим формулам надо рассчитывать среднюю скорость движения дуги. Эти данные позволяют рассчитать вольтамперные характеристики дуги для различных значений ее длины. Аналогично этому, критическую длину дуги $l_{кр}$ определяем методом подбора и она соответствует условиям касания реостатной и вольтамперной характеристик. Для щелевых камер используем зависимость (3-24). По формуле (3-13) определяем диаметр дуги и проверяем, какой из этих зависимостей надо пользоваться в конкретных условиях.

7. По рассчитанному времени дуги t_r можно найти энергию дуги за одно отключение или количество электричества, прошедшего за это время по дуговому промежутку. Тогда на основе зависимостей, приведенных в § 3-7, можно оценить массовый и линейный износ контактов за n отключений цепи. Количественная оценка износа позволяет определить необходимый провал контактов, который должен быть в 1,5—2,5 раза больше линейного износа.

Характеристика противодействующих сил контактора и сечение магнитопровода электромагнита. Допустим, что выбрана такая кинематическая схема контактора, при которой расстояние от оси вращения якоря до центра полюса электромагнита вдвое меньше расстояния от этой оси до точки касания

контактов. Тогда приведенные к воздушному зазору электромагнита: контактное нажатие $P'_k = 2P_k = 2 \cdot 4 = 8$ Н, раствор контактов $\beta' = \beta/2 = 2/2 = 1$ см. Провал контактов примем равным 0,4 см.

По этим данным можно построить характеристику противодействующих сил контактора (см. рис. 3-86). Допустим, что сила возвратной пружины при критическом зазоре $\delta_{кр} = 0,4$ см равна 3Н. Тогда суммарная противодействующая сила $P'_{кр} = P'_k + 3Н = 8Н + 3Н = 11Н$.

По данным, приведенным в § 3-11, тяговая сила электромагнита при этом зазоре $P_э = K_э P'_{кр} = 1,25 \cdot 11 = 13,7$ Н. По этой силе можно определить сечение магнитопровода электромагнита, если задаться индукцией в воздушном зазоре. Если $B_\delta = 0,5$ Тл, то

$$S = 2P_э \mu_0 / B_\delta^2 = 2 \cdot 13,7 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} / 0,5^2 = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1,37 \text{ см}^2.$$

Значение S дает возможность выбрать основные размеры магнитной системы электромагнитного привода. Затем проводятся расчеты тяговых характеристик и обмотки электромагнита с использованием зависимостей, излагаемых в общих или специальных курсах электрических аппаратов.

Глава 4

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

§ 4-1. ЗАЩИТА ОТ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ

В электроустановках к аварийным режимам относят прохождение токов короткого замыкания, тока перегрузки, понижение напряжения в сети. Токи перегрузки электрооборудования, обычно в 7—10 раз превышающие номинальные, при относительно длительном их прохождении могут нагреть токоведущие элементы до недопустимых температур. Поэтому время прохождения этих токов должно быть таким, чтобы температура нагрева аппаратов не превышала допустимую.

Чем больше кратность тока перегрузки по отношению к номинальному, тем меньше допустимое время его прохождения. Защита от перегрузки обеспечивается тепловыми реле пускателей, расцепителями автоматов или устройствами защиты на нелинейных элементах (позисторами). Для электрооборудования характерна зависимость допустимого времени прохождения тока от его значения (кривая 2 на рис. 4-1). Чтобы защитить установку от перегрева током, необходимо обеспечить такую времятоковую характеристику устройств защиты (кривая 1), которая строится ниже соответствующей характеристики защищаемого оборудования (кривая 2).

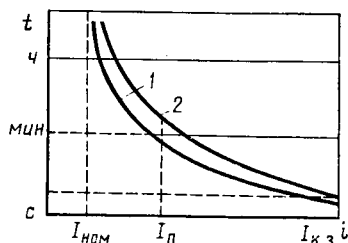


Рис. 4-1. Время-токовые характеристики

Токи короткого замыкания опасны своими электродинамическими и термическими воздействиями. Как известно, между двумя проводниками с током I (А) существует электродинамическая сила взаимодействия (Н):

$$P_{эд} = (\mu_0/4\pi) K_k I^2. \quad (4-1)$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ — магнитная проницаемость воздуха, Гн/м.

Коэффициент контура K_k для двух параллельных проводников одинаковой длины l , расположенных на расстоянии a друг от друга, при $a < 2l$ составляет $K_k = (2l/a)[\sqrt{1 + (a/l)^2} - a/l]$.

При токах в десятки—сотни ампер сила $P_{эд}$ невелика. Но при токах короткого замыкания в десятки тысяч ампер эта сила достигает тысяч ньютон и она может разрушить изоляционные и другие конструкции, на которых крепятся токоведущие части. Электродинамическая сила отталкивания возникает также в замкнутых контактах вследствие сужения линий тока в контактной точке. Она определяется зависимостью (1-61).

При токах в десятки тысяч ампер эти силы могут самопроизвольно под током разомкнуть контакты аппарата. Тогда возникающая дуга может разрушить аппарат, оказавшийся неподготовленным к режиму отключения этих токов. Аппарат должен быть способным пропускать сквозные токи короткого замыкания и не разрушаться вследствие электродинамических сил, т. е. он должен обладать необходимой электродинамической стойкостью. Обычно этот параметр определяется максимально допустимым током короткого замыкания. Так как электродинамические силы воздействуют на конструкцию аппарата практически мгновенно, то для них в этом отношении особенно опасны ударные токи короткого замыкания. Характер изменения тока i во времени при возникновении коротких замыканий в сетях переменного тока аналогичен изменению, показанному на рис. 1-5, а.

Расчеты термической и электродинамической стойкости, а также процессов отключения токов короткого замыкания надо производить, исходя из реальных значений токов короткого замыкания. Обычно их рассчитывают, исходя из возникновения в сети так называемого глухого (металлического) короткого замыкания, когда сопротивление в месте замыкания равно нулю. Это справедливо для относительно небольших токов короткого замыкания. Но когда они измеряются десятками, сотнями тысяч ампер, в месте короткого замыкания возникают такие большие электродинамические усилия, что они почти мгновенно отбрасывают металлическую перемычку, вызвавшую замыкание между токоведущими проводниками. В результате образуется электрическая дуга, сопротивление которой ограничивает ток короткого замыкания и не позволяет ему возрасти до значений, характерных для глухого короткого замыкания. Часто короткие замыкания возникают через электрическую дугу (пробой изоляции, перекрытие тонким проводником, который мгновенно сгорает). В этом случае ток короткого замыкания также ограничивается сопротивлением электрической дуги.

Допустим, что две токоведущие шины 1 и 2 перемкнуты попавшим на них металлическим проводником 3 (рис. 4-2, а). Электродинамическая сила $P_{эд}$ отбрасывает этот проводник от шин. При конкретных размерах ($a = 10$ см, $b = 1$ см) расчетная сила: $I = 100$ кА, $P_{эд} = 6500$ Н; $I = 200$ кА, $P_{эд} = 25\,100$ Н; $I = 300$ кА, $P_{эд} = 58\,600$ Н.

Такие силы способны очень быстро сбросить с шин попавший на них предмет, прежде чем ток короткого замыкания достигнет

установившегося значения. Определим время, за которое перемычка отбрасывается от шин на расстояние l . По закону Ньютона $P = ma = md^2l/dt^2$, где m — масса перемычки, кг; a — ускорение, м/с²; l — длина пути, м; t — время, с.

Из решения этого дифференциального уравнения при начальных условиях $t = 0$, $l = 0$ и $dl/dt = 0$ время $t = \sqrt{2ml/P}$.

Рассчитанное по этой формуле время, необходимое для перемещения перемычки массой 2 кг на расстояние 2 см при токе $I = 100$ кА, составляет $t = 0,0035$ с. Это время меньше обычного для электрических аппаратов собственного времени срабатывания. Таким образом, в заданных условиях к моменту расхождения контактов отключающего аппарата в месте короткого замыкания создаются условия для образования электрической дуги, длина которой за счет электродинамических сил быстро увеличивается. Ток короткого замыкания, который отключается аппаратом, существенно ограничивается за счет сопротивления дуги.

Рассмотрим другой случай, когда короткое замыкание образовано двумя сомкнувшимися контактами. Электродинамическая сила их отталкивания определяется зависимостью (1-61). Для конкретного примера, когда $P_k = 196$ Н, $\sigma_{см} = 49\,050$ Н/см² (медь), $S_0 = P_k/\sigma_{см}$ (P_k — сила нажатия в контактах), $D = 2,2$ см, $I = 100$ кА, по (1-65) и (1-61) находим $P_{эд} = 6770$ Н. При $I = 200$ и 300 кА эта сила соответственно составляет 27 000 и 60 800 Н. Такие силы способны отбросить соприкасающиеся между собой контакты и образовать в этом месте электрическую дугу, сопротивление которой ограничивает ток короткого замыкания.

На рис. 4-2, б показана зависимость между расчетными значениями токов короткого замыкания $I_{расч}$ и токами $I_{оп}$, которые зафиксированы в соответствующих условиях опыта. Расчетные значения тока короткого замыкания получены при условии возникновения глухого замыкания, когда учитывается лишь сопротивление проводников и не учитывается сопротивление дуги. В этих условиях опытные значения тока $I_{оп}$ совпадают с расчетными $I_{расч}$ (кривая 1). Но из-за влияния дуги $I_{оп} < I_{расч}$ (кривая 2).

Как видно из приведенных графиков, реальные значения токов короткого замыкания в сетях низкого напряжения не превышают 100 кА, в то время как расчетные их значения для соответствующих условий определяются несколькими сотнями килоампер. Это существенно облегчает условия работы отключающих аппаратов (автоматов, предохранителей).

При определении возможных токов короткого замыкания следует учитывать еще одно обстоятельство. В низковольтных электрических сетях наиболее распространенной является двигательная нагрузка. В нормальном режиме двигателя потребляют энергию из электрической сети. При коротком замыкании, когда резко падает напряжение на нагрузке, двигатели переходят в генера-

торный режим, продолжая вращаться некоторое время за счет запасенной кинетической энергии. Эта энергия и энергия магнитных полей в результате преобразования приводит к некоторому увеличению тока короткого замыкания. Как показывают наблюдения, это увеличение может достигать 20—30% (в месте короткого замыкания).

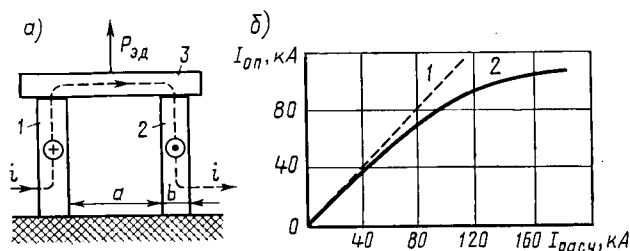


Рис. 4-2. Степень ограничения токов короткого замыкания сопротивлением дуги

Номинальный ток нагрузки $I_{ном}$ определяется напряжением $U_{ном}$ и суммой сопротивлений объекта нагрузки $Z_{нг}$, а также подводящих проводов $Z_{пр}$: т. е. $I_{ном} = U_{ном} / (Z_{нг} + Z_{пр})$. Обычно $Z_{пр} \ll Z_{нг}$ и $I_{ном} \approx U_{ном} / Z_{нг}$. Ток короткого замыкания ограничивается лишь сопротивлением проводов, т. е. $I_{к.з} = U_{ном} / Z_{пр}$. Поэтому обычно $I_{к.з} \gg I_{ном}$. Иногда $I_{к.з}$ превышает $I_{ном}$ в сотни и тысячи раз и достигает сотен килоампер. Но статистика показывает, что в 75% случаев токи короткого замыкания не превышают 45 кА. Влияние удаленности места короткого замыкания на значения $I_{к.з}$ показано на рис. 4-3. На нем изображена схема участка реальной распределительной сети за трансформатором напряжением 10 000 кВ·А и указаны реальные значения $I_{к.з}$ в нескольких точках. Коммутация тока в схеме осуществляется выключателями $B_1 - B_7$; S — сечение проводов на отдельных участках, l — их длина.

Понижение напряжения в сетях с двигательной нагрузкой означает повышение тока (перегрузку), так как механическая нагрузка на валу двигателей остается неизменной. Это определяет постоянство развиваемой двигателем мощности $P_{эл} = P_{мех} = UI$. К токам перегрузки относят также пусковые токи двигателей, которые могут в 5—10 раз превышать номинальные токи. Допустимое время прохождения токов перегрузки регламентируется моментом достижения допустимой температуры нагрева токоведущих частей и оборудования. При небольших перегрузках (1,5—2 $I_{ном}$) это время может достигать десятков минут и даже часов, при больших токах перегрузки оно может снижаться до долей секунды.

Основное назначение автоматических выключателей и предохранителей — это защита электрооборудования от аварийных режимов. Автоматические выключатели могут защищать установку

от токов короткого замыкания, перегрузки и от понижения напряжения, предохранители защищают от токов короткого замыкания.

На основе автоматических выключателей (автоматов) и предохранителей создается *селективная (избирательная) система защиты* электрических сетей и установок. Она должна обеспечивать отключение в аварийных условиях минимального числа потребителей энергии, а также резервную защиту, если основная защита откажет в работе.

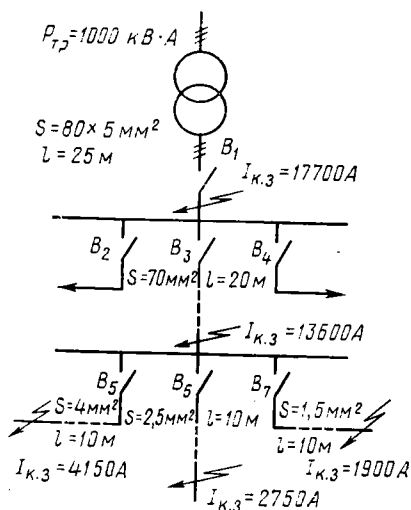


Рис. 4-3. Схема участка распределительной сети:

S —сечение проводов; l —длина проводов

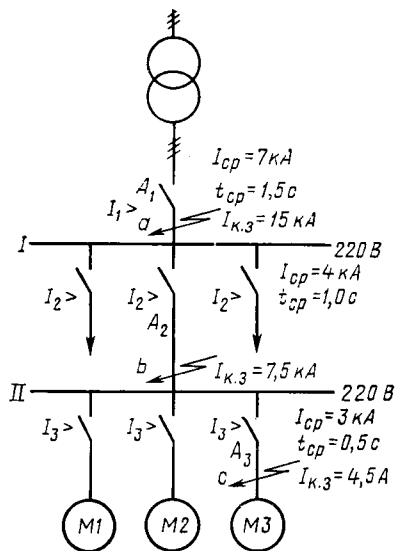


Рис. 4-4. Схема участка сети с параметрами селективной защиты

Рассмотрим принцип построения селективной защиты от токов короткого замыкания на примере участка распределительной сети (рис. 4-4). Основные факторы селективной защиты — токи $I_{ср}$ и времена $t_{ср}$ срабатывания автоматов A_1, A_2 и A_3 . От понижающего трансформатора Tr питаются шины I распределительного устройства. От них отходит ряд ответвлений (фидеров) к потребителям. Через автомат A_2 подается питание на шины II другого распределительного устройства, от которого идут ответвления к двигателям $Дв1, Дв2, Дв3$. Защита сети селективная, если при коротком замыкании, например, в точке c обесточивается лишь цепь двигателя $Дв3$, т. е. отключается автомат A_3 . Все другие автоматы остаются включенными и подают питание по остальным ответвлениям, в которых нет неисправностей.

Если автомат A_3 по какой-либо причине не срабатывает, то срабатывает следующая ступень защиты. По пути тока короткого

замыкания от трансформатора до точки c эту ступень защиты осуществляет автомат A_2 . Действительно, при возникновении короткого замыкания в точке c по цепи трансформатора до этой точки проходит ток $I_{к.з}=4,5$ кА, который превышает токи срабатывания расцепителей автоматов A_3 и A_2 , поэтому они начинают срабатывать. Время их срабатывания разное. Автомат A_3 срабатывает за 0,5 с, а автомат A_2 — за 1 с. Если автомат A_3 работает нормально, то через 0,5 с автомат A_3 отключается, прохождение тока короткого замыкания по цепи прекращается. Автомат A_2 не успевает отключиться и возвращается в исходное состояние. Но если автомат A_3 отказывает в работе, то через 1 с срабатывает автомат A_2 . Этот автомат отключается и прекращает прохождение аварийного тока по цепи. Отключение автомата A_2 менее целесообразно, так как оно приводит к обесточиванию нормально работающих потребителей — двигателей $Dв1$ и $Dв2$. При коротком замыкании в точке b начинают работать автоматы A_2 и A_1 , так как токи их срабатывания меньше тока короткого замыкания в точке b . Но время срабатывания автомата A_1 больше, чем автомата A_2 . Поэтому автомат A_1 отключает цепь с током лишь в том случае, если отказывает в работе автомат A_2 .

Из рассмотренного видно, что селективность защиты достигается прежде всего за счет разного времени срабатывания предыдущей и последующей ступеней защиты. Разница во времени срабатывания этих ступеней называется *ступенью селективности по времени*. Существует также ступень селективности по току. Так, автомат A_1 может срабатывать при коротких замыканиях в точках a и b , но он не срабатывает при коротком замыкании в точке c .

В разветвленной сети нарастание выдержки времени от одной ступени защиты к другой может привести к недопустимо большой величине этой выдержки на последних ступенях защиты. Так, у автомата A_1 выдержка времени защиты 1,5 с, но при возникновении короткого замыкания в точке a может потребоваться более раннее отключение аварийной цепи. Длительное прохождение большого тока короткого замыкания (10 кА) может привести к недопустимому нагреву проводов в цепи. Поэтому при больших токах целесообразно осуществлять мгновенное отключение автомата (расположенного близко к месту короткого замыкания) с помощью *токовой отсечки*.

Для автоматических выключателей в зависимости от их номинального тока и напряжения установлены предельные значения токов короткого замыкания, которые они должны отключать (табл. 4-1).

Мощные и быстродействующие автоматические выключатели и предохранители способны ограничивать ток короткого замыкания за счет активного сопротивления R_d электрической дуги, возникающей в них при отключении тока I (рис. 4-5, a). Сопротивление R_d может оказаться существенно больше сопротивления проводов $Z_{пр} \ll R_d$. Кривая ограниченного постоянного тока при отключении дана на рис. 4-5, b . До момента t_1 возникнове-

Номинальный ток автомата, А	Допустимые токи (кА) при различных напряжениях, В								
	в сетях переменного тока						в сетях постоянного тока при постоянной времени τ		
	380		500		600		220	440	τ , мс
	I_y	I_d	I_y	I_d	I_y	I_d			
400	50	25	50	25	50	25	30	25	10
630	60	30	60	30	60	30	35	30	10
1000	70	35	70	35	60	30	40	35	15
1600	95	45	75	35	63	30	55	45	15
2500	105	50	85	40	75	95	60	50	15
4000	165	75	130	60	105	50	65	55	15

Обозначения: I_y — ударный ток короткого замыкания; I_d — действующее значение тока короткого замыкания.

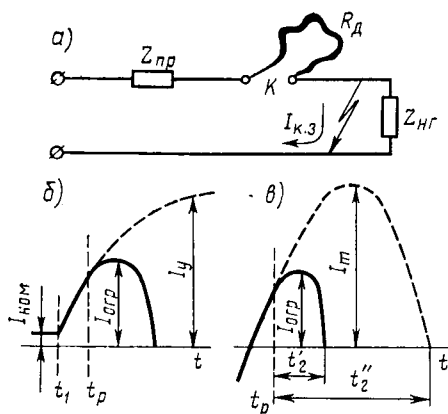


Рис. 4-5. Ограничение тока короткого замыкания

ния короткого замыкания проходит номинальный ток нагрузки $I_{ном}$. Возникающая в момент t_p электрическая дуга ограничивает максимальный ток до $I = I_{огр}$, который меньше установившегося тока короткого замыкания ($I_{огр} < I_y$). Аппарату легче отключать ток $I_{огр}$, чем I_y .

При отключении короткого замыкания на переменном токе (рис. 4-5, б) в момент t_p возникает электрическая дуга и ток ограничивается — $I_{огр} < I_m$, где I_m — амплитудное значение тока короткого замыкания. Время дуги также сокращается ($t'_r < t''_r$).

Кроме рассмотренных может возникнуть особый аварийный режим в электроустановках, когда под напряжение попадает человек. Если через тело человека проходит ток 15—25 мА, происходит судорожное сокращение мышц. При токах 0,1—3,0 А и временах их протекания 0,3—0,5 с возникает необратимая фибрилляция сердца. Допустимое время действия тока в зависимости от его величины, полученное из условия невозникновения фибрилляции сердца, определяется значениями:

Ток, мА	280	130	60	25	14
Время, с	0,02	0,1	0,5	3,0	10,0

Сопротивление тела человека зависит от многих факторов. В наиболее типичных случаях оно составляет от 1 до 2 кОм. При попадании под напряжение 220 В через человека идет ток около 100—200 мА. Следовательно, *электрический аппарат должен отключить напряжение с установки за время $t < 0,1$ с. Защитные автоматические аппараты должны быть быстродействующими и высокочувствительными (срабатывают при малых токах)*. Обычно аппараты защиты от поражения электрическим током реагируют на изменение напряжений на отдельных участках схемы электропитания при попадании человека под напряжение или на изменение тока в отдельных элементах схемы. Рассмотрим принцип построения таких автоматов, реагирующих на токи нулевой последовательности.

На рис. 4-6 приведены схемы и векторные диаграммы токов при соприкосновении человека с токоведущей частью. В сетях с заземленной нейтралью (рис. 4-6, а) это вызывает увеличение тока I_1 в соответствующей фазе за счет тока I_0 от замыкания этой фазы на землю. В результате появляется ток небаланса $I_{H\delta}$ (рис. 4-6, в), чего нет в нормальном режиме (рис. 4-6, б).

В сети с изолированной нейтралью (рис. 4-6, г) на землю текут емкостные токи, сумма которых в нормальном режиме равна нулю (рис. 4-6, д). При по-

падении человека под напряжение соответствующая фаза приобретает потенциал земли. Емкости двух других фаз находятся под линейными междупазовыми напряжениями U_{1-2} и U_{1-3} (рис. 4-6, е). Соответствующие им токи, опережающие их на 90° , дают суммарный ток небаланса $I_{H\delta} > 0$. В том и другом случае при соприкосновении человека с токоведущей частью в трехфазной системе появляется ток небаланса, который в любой момент времени имеет определенное значение. Автомат реагирует на появление этого тока и снимает напряжение с защищаемой установки. Измерительным элементом в нем является трансформатор тока нулевой по-

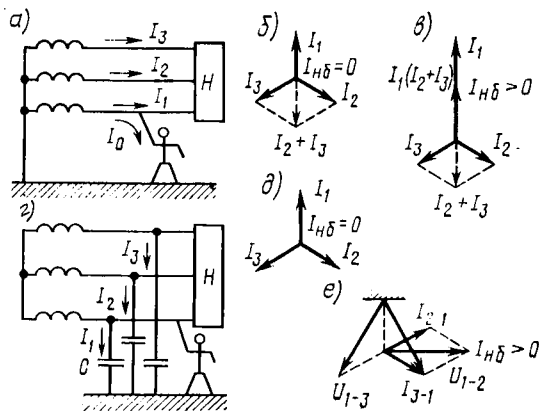


Рис. 4-6. Схема и векторные диаграммы токов при попадании человека под напряжение

Схема включения защитного автомата показана на рис. 4-7. На ток небаланса реагирует трансформатор тока нулевой последовательности *ТНП*. Первичные обмотки трех фаз охвачены общим магнитопроводом *М*. В симметричной трехфазной системе ток небаланса равен нулю, поэтому магнитный поток в магнитопроводе не возникает и во вторичной обмотке ω ЭДС не наводится. Возникший при попадании человека под напряжение одной из фаз ток небаланса создает несимметричный режим в *ТНП*, появление магнитного потока в магнитопроводе и наведение ЭДС в обмотке ω , что обуславливает подачу сигнала на отключение защитного автомата.

Схема (рис. 4-7) работает следующим образом. В отключенном состоянии или в симметричном режиме контакты *К* токового

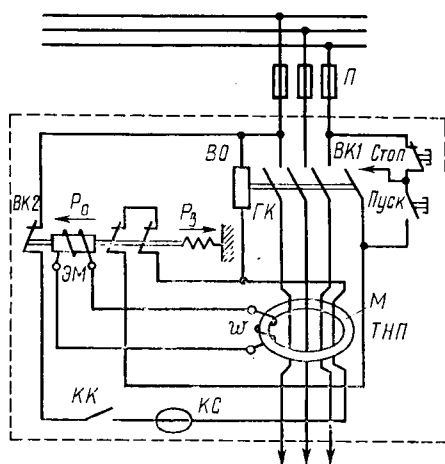


Рис. 4-7. Схема соединений автомата защитного отключения

реле замкнуты под действием силы P_B включающей пружины. Нажатием кнопки *Пуск* линейное напряжение сети подается на включающую обмотку *В0* основного коммутатора. Главные контакты *ГК* замыкаются и напряжение подается потребителю. Отпускание кнопки *Пуск* не приводит к разрыву цепи тока через обмотку *В0*, так как кнопка зашунтирована вспомогательными контактами *БК1*.

Попадание человека под напряжение вызывает ток небаланса в трехфазной системе. На обмотке ω трансформатора *ТНП* появляется ЭДС, которая создает ток через обмотку электромагнитного элемента *ЭМ*. Возникшая электромагнитная сила $P_{ЭМ}$ размыкает контакты *К*, которые разрывают цепь удерживающей обмотки *В0*. Главные контакты *ГК* основного коммутатора снимают напряжение с защищаемой установки. Вспомогательная цепь через контакты *БК2*, контрольный сигнальный элемент *КС*, контакты *КК*, вспомогательные контакты *БК1* позволяют контролировать при нажатии кнопки *КК* исправность и готовность к срабатыванию всех связанных с ними узлов аппарата. Предохранители *П* служат для защиты установок от токов короткого замыкания.

Ниже приведены технические параметры автомата защиты человека от поражения током типа АЕ2046:

Напряжение, В	380
Ток, А	40

Ток срабатывания при утечке за землю, мА	15
Время срабатывания защиты при утечке тока на землю, с	0,1
Время готовности к работе после отключения, с	0,2

§ 4-2. УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ (АВТОМАТОВ)

Существуют универсальные и установочные автоматы, предназначенные для работы в общепромышленных электрических сетях. Их отличие состоит лишь в том, что установочные автоматы имеют закрытый пластмассовый корпус и могут устанавливаться в общедоступных местах, а универсальные такого корпуса не имеют и работают лишь в закрытых распределительных устройствах, куда имеется доступ лишь для обслуживающего персонала.

Минимальные значения электродинамической и термической стойкости автоматов, приведенные ниже, регламентированы и зависят от их номинальных токов:

Номинальный ток, А	Ток электродинамической стойкости, кА	Термическая стойкость I^2t , (А ² с·10 ⁶)
25	1,5	0,2
100	2,0	2,0 $\frac{1}{2}$
400	50,0	110
1000	85,0	1120
4000	160,0	11520

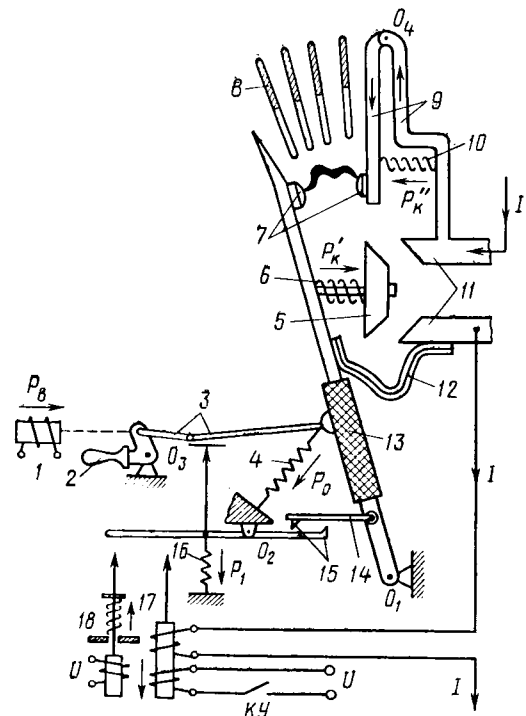
Взаимодействие основных элементов и узлов автоматического выключателя поясняется схемой (рис. 4-8). Выключатель коммутирует электрическую цепь с током I . В указанном положении автомат отключен и силовая электрическая цепь разомкнута. Чтобы включить автомат, надо или вращать по часовой стрелке рукоятку ручного включения 2, или подать напряжение на электромагнитный привод 1. В том и другом случаях создается усилие, которое, перемещая рычаги 3 вправо, поворачивает основную несущую деталь 13 автомата вокруг неподвижной оси O_1 по часовой стрелке. Первыми замыкаются и включают цепь тока *разрывные (дугогасительные) контакты* 7. Гибкая связь 12 создает цепь тока через подвижный дугогасительный контакт 7, жестко связанный с несущей деталью 13. При дальнейшем движении детали 13 вправо через некоторый интервал времени замыкаются главные контакты 11, по которым проходит основная часть тока. После завершения операции включения вся система остается в крайнем правом положении, она встает на специальную защелку 14 с зубцами 15. Сила P_1 пружины 16 удерживает ее в этом состоянии.

Отключающая пружина 4 взводится при включении автомата. Она перемещает подвижную систему автомата влево (поворот вокруг оси O_1 против часовой стрелки) и отключает автомат, если

рычаги 3 переведены вверх за мертвую точку. Это перемещение осуществляется через механическую связь от любого из расцепителей 17 и 18. Защита от токов короткого замыкания производится максимальным расцепителем 17. Когда по обмотке этого расцепителя проходит ток короткого замыкания, на якоре создается сила, переводящая рычаги 3 вверх за мертвую точку, в результате

чего автомат отключается под действием отключающей пружины 4.

На обмотку *минимального расцепителя* 18 подается напряжение защищаемой сети. Если это напряжение имеет нормальное значение, то создается электромагнитная сила, достаточная для удержания сердечника катушки расцепителя в притяннутом, нижнем, положении. При понижении напряжения сети сила, развиваемая электромагнитной системой расцепителя, уменьшается, становясь меньше силы его пружины. Подвижная система расцепителя переходит в верхнее положение, осуществив перевод рычагов 3 за мертвую точку и отключение автомата. Расцепитель 17 выполняет также функции независимого расцепителя (отключающей катушки). Если на его нижнюю обмотку через кнопку КУ подается напряжение, он срабатывает и осуществляет дистанционное отключение автомата по команде оператора.



янии. Но силы нажатия этих пружин могут оказаться недостаточными для удержания контактов в замкнутом состоянии при прохождении по ним токов короткого замыкания. В контактах появляются электродинамические усилия, которые могут оторвать один контакт от другого, а образовавшаяся дуга может сварить их. Во избежание самопроизвольного размыкания контактов при прохождении по ним тока короткого замыкания применяют *компенсаторы электродинамических усилий*. На рис. 4-8 изображен компенсатор 9, относящийся к разрывным контактам и искусственно образующий «петлю тока». По двум его параллельным шинкам, связанным друг с другом общей осью вращения O_4 , проходят токи разного направления. Появляется электродинамическая сила, которая воздействует на левую подвижную деталь компенсатора в ту же сторону, что и контактная пружина 10. Результирующая сила способна противостоять электродинамической силе отталкивания контактов и контакты самопроизвольно не расходятся.

Система рычагов 3 выполняет функции механизма свободного расцепления, который в реальных автоматах имеет более сложное устройство, чем это показано на рассматриваемом рисунке. Механизм свободного расцепления позволяет автомату отключаться в любой момент времени, в том числе и в процессе включения, когда включающая сила воздействует на подвижную систему автомата. Если рычаги 3 переведены вверх за мертвую точку, жесткая связь между приводом 1 (или 2) и подвижной системой автомата нарушается. Автомат немедленно отключается за счет действия возвратной пружины 4, независимо от того, воздействует ли включающая сила на приводную систему автомата или нет.

Механизм свободного расцепления предотвращает возможность «прыгания» автомата при включении его на существующее в цепи короткое замыкание. Представим, что при соприкосновении контактов включающего автомата по цепи проходит ток короткого замыкания. В этом случае максимальный расцепитель 17 срабатывает и переводит рычаги механизма свободного расцепления 3 вверх за мертвую точку. Автомат отключается и больше не включается, так как механическая связь между включающей силой и подвижной системой автомата нарушена. Если механизма свободного расцепления нет, то после автоматического отключения автомата последует его немедленное повторное включение под воздействием силы включающего устройства, которая к этому времени может казаться неснятой. При этом происходят быстро следующие друг за другом многократные отключения и включения автомата в тяжелом режиме короткого замыкания, что может привести к разрушению автомата.

Вместо электромагнитного привода 1 автомат может иметь *электродвигательный привод*. После отключения автомата через вспомогательные контакты включается под напряжение электродвигатель небольшой мощности и он взводит специальную пружину. При подаче команды на включение она освобождается

и автомат включается. Встраиваемый в контактную систему автомата элемент 9 (рис. 4-8) в виде «петли тока» можно преобразовать в устройство с большим числом петель тока. На рис. 4-9 изображены два варианта двойной петли, которые встраиваются в автоматы серий А-3000. В варианте (рис. 4-9, а) подвижная часть 3 испытывает силу притяжения к детали 4 (токи одинакового направления) и силу отталкивания от неподвижной детали 2. Следовательно, возникающие существенные электродинамические силы взаимодействия при токах короткого замыкания направлены в сторону размыкания контактов ГК. Этот фактор используется в токоограничивающих автоматах. Под действием электродина-

мических сил контакты в таком автомате расходятся очень быстро, возникающая между ними электрическая дуга своим сопротивлением ограничивает ток короткого замыкания.

Перестановка деталей 3—4 описанного устройства (рис. 4-9, б) на 180° изменяет на противоположное направление сил электродинамического взаимодействия. Электродинамическая сила $P_{эд}$, действующая на деталь 3, совпадает по направлению с силой P_k контактной пружины. Устройство работает как компенсатор

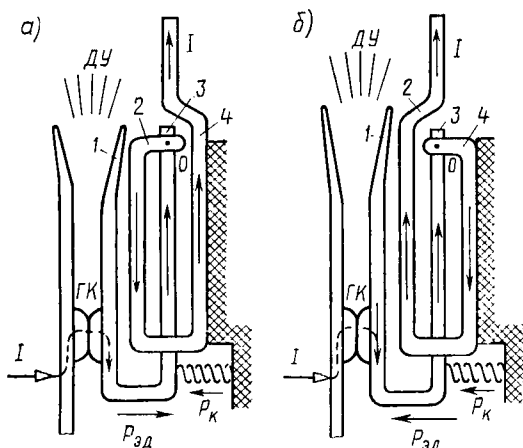


Рис. 4-9. Электродинамический элемент для размыкания контактов (а) и компенсатор сил в контактах (б)

электродинамических сил в контактах при токах короткого замыкания. Автоматы, в которых можно задавать необходимые по условиям селективной защиты токи и времени срабатывания, называют *селективными*.

Возникающие при отключении тока короткого замыкания электродинамические силы отталкивания контактов можно уменьшить путем разделения контактов на параллельные ветви. Если общий ток I_0 проходит по одному контакту, то эти усилия пропорциональны, т. е. $P_{эд} = KI_0^2$.

Когда имеется n параллельных ветвей, суммарное электродинамическое усилие уменьшается в n раз:

$$P_{эд} \approx nK(I_0/n)^2 = KI_0^2/n. \quad (4-2)$$

Но вследствие обычной для реальных условий неравномерности распределения тока по параллельным контактам эффективность этого способа может значительно снизиться. В реальных ус-

ловиях при двух параллельных контактных парах результирующее усилие отброса может снижаться не в два раза, а лишь на несколько десятков процентов.

§ 4.3. ПЕРЕХОД ТОКА С ГЛАВНЫХ КОНТАКТОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ЦЕПЬ

В автоматах при отключении цепи ток переходит с главных контактов в дугогасительные. Аналогичные явления возникают в гибридных и некоторых видах синхронных контактов — с основных контактов ток переходит в полупроводниковую приставку или шунтирующий синхронизирующий элемент. Время этого процесса должно быть минимальным, чтобы возникающая дуга не выжигала главные контакты.

Аналитическое описание процесса перехода тока в параллельную цепь произведем на основе схемы замещения, изображенной на рис. 4-10, а, при условиях: процессы перехода не оказывают влияния на общий ток I_0 . Допустим, что напряжение на контактах U_K остается постоянным; индуктивности L_1 и L_2 , взаимоиндуктивность M_{1-2} и сопротивления R_1 и R_2 ветвей не изменяются. Общий характер изменения токов в ветвях показан на рис. 4-10, б [13].

Процессы перехода тока описываются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= L_1 di_1/dt + R_1 i_1 + U_K + M_{1-2} di_2/dt; \\ U_2 &= L_2 di_2/dt + R_2 i_2 + M_{1-2} di_1/dt; U_1 = U_2. \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

Для переменного тока, когда $i_0 = i_1 + i_2 = \sqrt{2} I_0 \sin \omega t = I_m \sin \omega t$, система (4-3) преобразуется к виду

$$L di_1/dt + (R_1 + R_2) i_1 + U_K = \sqrt{2} I_0 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2')^2} \sin(\omega t + \omega t_p + \varphi). \quad (4-4)$$

Здесь I_0 — действующее значение общего тока; t_p — момент размыкания главных контактов ГК относительно синусоиды тока (рис. 4-10, б); $L = L_1 + L_2 - 2M_{1-2}$; $L_2' = L_2 - M_{1-2}$; $\varphi = \arctg(\omega L_2'/R_2)$.

Решение уравнений (4-4) имеет вид

$$\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} I_0 \frac{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2')^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}} \sin[\omega(t_p + t) + \varphi - \varphi'] - \\ &\quad - [U_K/(R_1 + R_2)] C_H \exp\left(-\frac{R_1 + R_2}{L} t\right), \end{aligned} \quad (4-5)$$

где $\varphi' = \arctg[\omega L/(R_1 + R_2)]$.

Постоянная интегрирования C_H находится из начального условия: $t = 0$, $i_1 = I_{10}$ (рис. 4-10, б). На основе (4-5)

$$I_{10} = \sqrt{2} I_0 \frac{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2')^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t_p + \varphi - \varphi'). \quad (4-6)$$

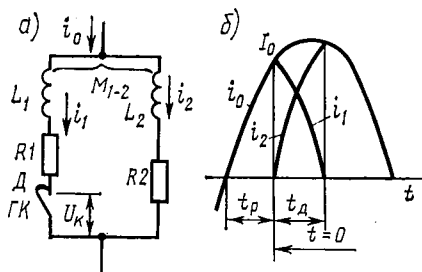


Рис. 4-10. Схема перехода тока в параллельную ветвь

Из (4-5) и (4-6) $C_{II} = U_K / (R_1 + R_2)$.
Окончательное выражение для тока i_1 :

$$i_1 = I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}} \sin [\omega (t_p + t) + \varphi - \varphi'] - \frac{U_K}{R_1 + R_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{R_1 + R_2}{L} t \right) \right]. \quad (4-7)$$

В (4-7) входят две слагающие тока: замыкающегося через внешнюю цепь и определяемого внешним источником:

$$i_c = I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}} \sin [\omega (t_p + t) + \varphi - \varphi'], \quad (4-8)$$

и тока, определяемого напряжением дуги на контактах U_K и замыкающегося через контур из двух параллельных ветвей схемы (рис. 4-10, а):

$$i_d = \frac{U_K}{R_1 + R_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{R_1 + R_2}{L} t \right) \right]. \quad (4-9)$$

С учетом этих слагающих общий ток в цепи главных контактов $i_1 = i_c - i_d$.

Из анализа (4-7) следует, что для надежного и быстрого перехода тока с главных контактов в параллельную цепь целесообразно выполнить два условия:

У с л о в и е 1. Максимальные значения токов i_c и i_d должны характеризоваться неравенством

$$(i_d)_{\max} > (i_c)_{\max};$$

$$\frac{U_K}{R_1 + R_2} > I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}}. \quad (4-10)$$

У с л о в и е 2. Скорость изменения для тока i_d должна быть существенно выше, чем для тока i_c :

$$(di_d/dt) \gg (di_c/dt).$$

На основе (4-8) и (4-9) находим

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{U_K}{L}; \quad \frac{di_c}{dt} = \omega I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}}.$$

Условие 2 после преобразований имеет вид:

$$\frac{U_K}{\omega L} \gg I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}}. \quad (4-11)$$

Правые части неравенств (4-10) и (4-11) одинаковы, а левые представляют собой отношения U_K к активной и индуктивной составляющим сопротивлений рассматриваемого контура, которые могут образовать полное сопротивление: $Z_K = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}$.

Тогда условия (4-10) и (4-11) допустимо свести к общему условию:

$$\frac{U_K}{Z_K} \gg I_0 \sqrt{\frac{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L)^2}}$$

или

$$U_K \gg I_0 \sqrt{2 [R_2^2 + (\omega L_2')^2]}.$$

С учетом принятого выше обозначения оно примет окончательный вид

$$U_K / \sqrt{2} I_0 \gg Z_2 = \sqrt{R_2^2 + [\omega (L_2 - M_{1-2})]^2}, \quad (4-12)$$

где Z_2 — полное сопротивление цепи, параллельной главным контактам аппарата.

Если выполняется условие (4-12), то время перехода тока в параллельную цепь мало и можно считать слагающую тока i_c за это время неизменной ($t \approx 0$ и $\omega t \approx 0$). Тогда по (4-7)

$$i_1 = I_0 \frac{R_2 \sqrt{2 [1 + (\omega L_2' / R_2)^2]}}{(R_1 + R_2) \sqrt{1 + [\omega L / (R_1 + R_2)]^2}} \sin (\omega t_p + \varphi - \varphi') - \frac{U_K}{R_1 + R_2} \left[1 - \exp \left(- \frac{R_1 + R_2}{L} t \right) \right]. \quad (4-13)$$

Из условия $i_1 = 0$ при $\varphi - \varphi' \approx 0$ и $\omega L_2' / R_2 \approx \omega L / (R_1 + R_2)$. Из (4-13) находим выражение для времени дуги на главных контактах:

$$t_d = [L / (R_1 + R_2)] \ln [U_K / (U_K - \sqrt{2} I_0 R_2 \sin \omega t_p)]. \quad (4-14)$$

Так как ток i_c принят не изменяющимся во времени, то (4-14) справедливо и для коммутации постоянного тока (тогда $\sin \omega t_p = 0$).

Из (4-14) следует, что время дуги снижается до нуля, если $L = L_1 + L_2 - 2M_{1-2}$ или

$$L_1 + L_2 = 2M_{1-2}. \quad (4-15)$$

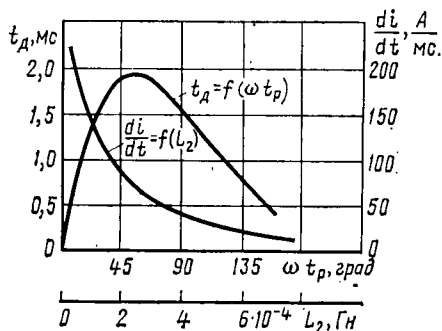


Рис. 4-11. Зависимости времени дуги и скорости перехода тока в параллельную ветвь

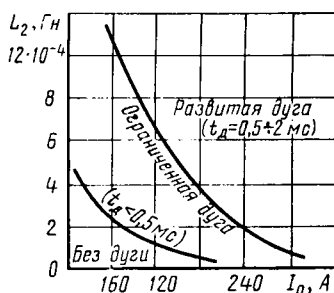


Рис. 4-12. Дуговые зоны при переходе тока в параллельную ветвь

Анализ полученных соотношений показывает, что при нарушении одного из условий (4-10) или (4-11) быстрый переход тока с ГК в параллельную цепь обеспечивается лишь в определенном диапазоне моментов размыкания контактов: $\omega t_p \ll \pi/2$ или $\omega t_p \gg \pi/2$, т. е. в начале или в конце полуволны тока.

Когда известно время дуги t_d на главных контактах, можно найти энергию дуги $W_d = \int_0^{t_d} U_K i_1 dt$, где i_1 определяется по (4-13).

Экспериментальные данные подтверждают справедливость изложенных теоретических зависимостей. На рис. 4-11 дана зависимость времени дуги t_d на главных контактах от момента их размыкания ωt_p относительно синусоиды

тока при $I_0 = 140$ А в условиях обычного аппарата с рычажными контактами. Там же представлена опытная зависимость скорости di/dt перехода тока с главных контактов от индуктивности L_2 параллельной цепи при $I_0 = 180 \div 240$ А и $R_1 = 0,09$ Ом, $L_1 \approx 0$.

На рис. 4-12 представлены области практически бездугового, ограниченно-дугового ($t_d \leq 0,5$ мс) и дугового ($t_d > 0,5$ с) переходов тока с ГК в параллельный контур в зависимости от совокупности значений отключаемого переменного тока I_0 и индуктивности L_2 параллельной ветви. Они относятся к условиям, характерным для силовых контактных аппаратов управления.

§ 4-4. РАСЦЕПИТЕЛИ АВТОМАТОВ

Расцепители автоматов обладают широкими возможностями для регулирования токов и времени их срабатывания. Соотношение времятоковых характеристик защищаемого объема и защитного аппарата, показанное выше по рис. 4-1, определяет зависимость допустимого времени работы электрооборудования от величины проходящего тока. Время срабатывания аппарата при том или ином токе должно быть меньше допустимого для оборудования времени прохождения этого тока.

При номинальном токе $I_{ном}$ защитный аппарат не срабатывает ($t = \infty$), при токе перегрузки I_n время его срабатывания может быть достаточно большим, при токе короткого замыкания $I_{к.з}$ аппарат срабатывает практически мгновенно (отсечка). Характерные параметры защитных аппаратов: минимальный ток срабатывания (в области токов) $I_n = 1,1 \div 1,6 I_{ном}$; установка большого аварийного тока (в области $I_{к.з}$) равна $3-15 I_{ном}$; время срабатывания при токе $7 I_{ном}$ составляет $1-16$ с; время срабатывания при токах более $16 I_{ном}$ менее 1 с.

Электромеханические расцепители строятся на электромагнитном, термобиметаллическом, термомагнитном, магнитоотрицательном и других принципах действия. Существуют также статические полупроводниковые расцепители. Принцип устройства одного из вариантов электромагнитного токового расцепителя показан на рис. 4-13. Токоведущая шина 2 охвачена магнитопроводом 1. Ток i , проходящий по шине, создает магнитный поток Φ , что вызывает появление электромагнитной силы $P_{эм}$, стремящейся притянуть якорь 14 к магнитопроводу 1. На неподвижной оси O_1 могут вращаться два рычага: на одном жестко укреплен якорь 14 электромагнита, другой связан рычажной системой с часовым анкерным механизмом 3-4. Силы пружин 6 и 8 неодинаковы ($P_0 \gg P_m$). Анкерное устройство часового механизма 3 может постепенно перепускать зубцы и рычаг 7 имеет возможность перемещаться медленно по часовой стрелке. Он не может перемещаться мгновенно. Если ток i невелик, то сила $P_{эм}$ не в состоянии растянуть пружину 8, она своей силой P_0 создает жесткую связь деталей 7 и 13, 14. Под действием силы $P_{эм}$ они медленно перемещаются, вращаясь вокруг оси O_1 . При большой силе $P_{эм}$, способной растянуть пружину P_0 , анкерное устройство служит удерживающим фактором относительно рычага 7, который остается на месте, а сила $P_{эм}$ растягивает пружину 8 и мгновенно переме-

щает вверх рычаг 13 с упором 9. Деталь 5 не соединена с деталью 13, она является для нее лишь упором.

Таким образом, когда создаваемая током электромагнитная сила $P_{эм}$ велика, якорь 14 может мгновенно притянуться к магнитопроводу. При этом пружина P_0 растянется, а рычаг 7 останется практически неподвижным. Перемещение якоря вызывает отключение автомата, так как упор 9 рычага 13 ударяет по защелке 10, поворачивает ее и освобождает деталь 11, связанную с подвижной системой автомата. Таким образом, при больших токах расцепитель срабатывает мгновенно. Значение тока, вызывающего мгновенное срабатывание и называемого током отсечки, зависит от силы P_0 пружины 8, регулируемой деталью 12: чем больше P_0 , тем выше ток отсечки.

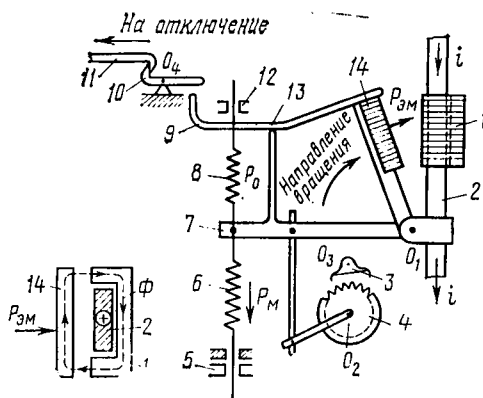


Рис. 4-13. Принципиальная схема устройства электромагнитного расцепителя с отсечкой тока

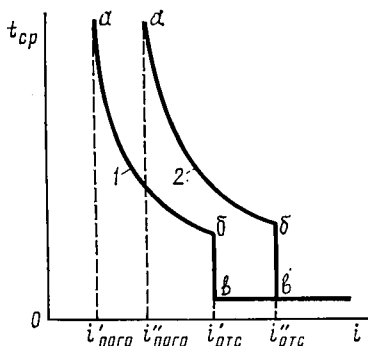


Рис. 4-14. Защитные характеристики автомата

Электромагнитная сила $P_{эм}$ при относительно небольших токах не может растянуть пружину 8. Она остается жестким связующим звеном между деталями 7 и 13. Электромагнитная сила постепенно перемещает (вращает вокруг оси O_1) жестко связанную систему деталей 7—8—13—14. Часовой механизм 3 постепенно перепускает эту систему, пока якорь не притянется к магнитопроводу и упор 9 не расцепит защелку 10—11, что вызовет отключение автомата. Скорость перемещения якоря и время срабатывания зависят от сил $P_{эм}$ и $P_м$, противодействующей пружины 6. Сила $P_м$ и время срабатывания изменяются с помощью детали 5. Натяжением пружины 6 регулируется также минимальный ток срабатывания (установка тока трогания). Изменением числа перепускаемых зубцов часового механизма 3 можно в широких пределах регулировать время срабатывания.

На рис. 4-14 приведены зависимости времени срабатывания $t_{ср}$ от тока i , характерные для данного типа расцепителя (см. рис. 4-13). Минимальный ток срабатывания (пограничный ток)

$i'_{\text{погр}}$ соответствует меньшей силе P_m пружины 6 (см. рис. 4-13), чем ток $i''_{\text{погр}}$. Характеристика 1 получена при меньшем числе перепускаемых зубцов анкера 3 часового механизма, чем характеристика 2. Сила P_0 пружины 8 возрастает с увеличением тока отсечки. Время срабатывания расцепителя на первом участке уменьшается с ростом тока, так как при этом возрастает электромагнитная сила $P_{\text{эм}}$. Этот участок характеристики носит название зависимого. Характеристики $t_{\text{ср}} = f(i)$, изображенные на рис. 4-14, называются ограниченно зависимыми, так как при токах, превышающих токи отсечки, время срабатывания не зависит от величины тока.

Расчет электромагнитного расцепителя проводится методами, излагаемыми в разделе электромагнитных устройств общего курса электрических аппаратов. Электромагнитная сила, развиваемая в рабочем воздушном зазоре (Н),

$$P_{\text{эм}} = (\Phi_{\delta}^2 R_{\delta}^2 / 2)(d/d\delta)(1/R_{\delta}), \quad (4-16)$$

где Φ_{δ} — магнитный поток в рабочем воздушном зазоре, Вб; R_{δ} — магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора, $1/\text{Гн}$; δ — рабочий воздушный зазор, м.

В широком рабочем диапазоне магнитных индукций (до насыщения) относительную магнитную проницаемость магнитных материалов μ можно принять примерно постоянной и равной: 15 000 — для холоднокатаной стали, 3000 — для стали 1211, 1500 — для стали 1312, 5000 — для стали 1411. Тогда магнитное сопротивление единицы длины стального магнитопровода $[1/(\text{Г} \cdot \text{м})]$ можно считать постоянным:

$$R_{\text{ст}}^0 = 1/(\mu \mu_0 S),$$

где $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$; S — сечение магнитопровода, м^2 .

Решение системы дифференциальных уравнений магнитной цепи при условии постоянства магнитного сопротивления стали для клапанных и Ш-образных электромагнитов позволяет получить выражение для магнитного потока (Вб) в рабочем воздушном зазоре [1]:

$$\Phi_{\delta} = \frac{Iw}{R_{\text{ст}}^0 h + R_{\delta} h \sqrt{g R_{\text{ст}}^0} / \left[\text{th} \left(h \sqrt{g R_{\text{ст}}^0} \right) \right]}, \quad (4-17)$$

где $Iw = F$ — магнитодвижущая сила обмотки; I — ток, А; w — число витков; h — высота магнитопровода, м; g — удельная (на единицу длины) магнитная проводимость рассеяния, Гн/м .

Величины R_{δ} и g вычисляются методами теории магнитных цепей, соответствующим типу магнитной системы расцепителя [2].

Характерным параметром для расцепителей автоматов является коэффициент возврата $K_{\text{в}} = I_{\text{отп}}/I_{\text{ср}} = 0 \div 1$, где $I_{\text{отп}}$ и $I_{\text{ср}}$ — токи отпущения и срабатывания, А.

Его величина для расцепителей токовой защиты должна быть большой ($K_B = 0,8 \div 0,9$), чтобы обеспечивать селективность в удаленных от источника участка сетей, где токи короткого замыкания могут оказаться близкими к номинальным токам нагрузки. Для автомата A_2 на рис. 4-4 ток срабатывания $I_{ср} = 4$ кА. Допустим, что номинальный ток фидера, на котором установлен автомат A_2 , равен $I_{ном} = 3,5$ кА. Автомат A_2 начинает срабатывать при возникновении короткого замыкания в точке C , чтобы отключить ток короткого замыкания в случае, если автомат A_3 откажет в работе. Если A_3 успешно сработает и отключит от сети место короткого замыкания, то автомат A_2 должен «отпустить» и не отключать работающие участки сети (время его срабатывания больше, чем у A_3). Но это произойдет только в случае, если ток отпускания у него выше номинального тока, т. е. $I_{отп} > I_{ном} = 3,5$ кА, так как примерно равный номинальному ток может проходить по автомату A_2 при отключении A_3 (за счет токов других фидеров 1, 2 и др.). В таком случае коэффициент возврата расцепителя автомата A_2 составляет $K_B = I_{отп}/I_{ср} = 3,5/4 = 0,88$.

Токи отпускания и срабатывания электромагнитного расцепителя можно определить из равенства развиваемых электромагнитных сил и сил возвратной пружины при отпуске $P_{отп}$ и срабатывании $P_{ср}$:

$$I_{отп} \rightarrow P_{эм.отп} = P_{отп}, \quad I_{ср} \rightarrow P_{эм.ср} = P_{ср}.$$

На основе (4-17) в условиях, когда магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора R_δ прямо пропорционально значению зазора δ , получаем окончательное выражение *коэффициента возврата электромагнитного токового расцепителя*:

$$K_B = \sqrt{\frac{P_{отп}}{P_{ср}}} \frac{R_{ст}^0 h + R_{\delta_{отп}} A_0}{R_{ст}^0 h + R_{\delta_{ср}} A_0}, \quad (4-18)$$

где $A_0 = h \sqrt{g R_{ст}^0} / [\text{th}(h \sqrt{g R_{ст}^0})]$; $P_{отп}$ и $P_{ср}$ — силы возвратной пружины при отпуске и срабатывании, Н; $R_{\delta_{отп}}$ и $R_{\delta_{ср}}$ — магнитное сопротивление рабочего воздушного зазора при отпуске и срабатывании, 1/Гн.

Отметим, что ферромагнитные материалы при достижении точки Кюри теряют свои магнитные свойства. Существуют сплавы, называемые терромагнитными, точка Кюри которых находится ниже 350°C (точка Кюри никеля). К ним относятся сплавы Fe—Ni, Ni—Cu и др. На рис. 4-15, б даны характеристики сплава H330X2 — кривая намагничивания $B = f(H)$ и зависимость индукции от температуры нагрева $B = f(T)$. Свойство уменьшения магнитной проницаемости таких сплавов с увеличением температуры нагрева использовано для построения разновидности электромагнитных расцепителей автоматов — терромагнитных расцепителей (рис. 4-15, а).

В режиме протекания номинального тока по обмотке 1 термомангнитная деталь 2 не нагревается до повышенной температуры и она не теряет магнитную проницаемость. Создаваемый током i магнитный поток Φ замыкается через нее и якорь 3 находится в верхнем положении. Повышение тока i приводит к перегреву обмотки 1 и детали 2, ее магнитное сопротивление увеличивается (проницаемость снижается) и магнитный поток Φ проходит через воздушный зазор δ . Электромагнитная сила притягивает якорь 3 к полюсу магнитопровода 6, защелка 4 освобождает механизм и автомат отключается. С помощью регулировочной гайки 5 изменяется натяжение пружины 5 и ток срабатывания расцепителя. Рассмотренные выше электромагнитные расцепители обычно осуществляют защиту от токов короткого замыкания. Для защиты от токов перегрузки в автоматах применяют биметаллические расцепители, основанные на применении биметаллических элементов (см. § 2-5).

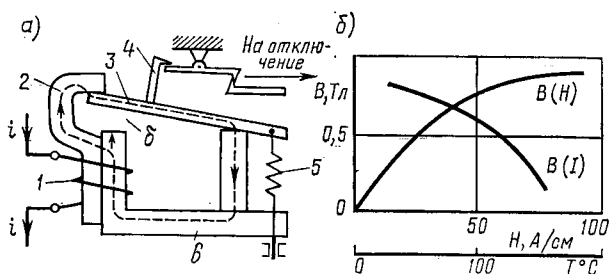


Рис. 4-15. Термомангнитный расцепитель

На рис. 4-16 для примера дана защитная характеристика автомата АП-50 с биметаллическим расцепителем. Для номинальных токов $I_{\text{ном}}$ тепловая постоянная времени $\tau_T = c\gamma b\delta/2K_T(b+\delta)$ и пороговый ток $I_{\text{погр}}$ (см. § 2-4) имеют следующие значения:

$I_{\text{ном}}, \text{ A}$	$I_{\text{погр}}, \text{ A}$	$\tau_T, \text{ c}$
10	12,5	55
25	31,0	90
50	62,5	125

В последнее время находят применение *магнитоотрицательные биметаллические расцепители*. Ряд материалов обладает свойством изменять свои линейные размеры в магнитном поле (магнитоотрицательная деформация). Коэффициент магнитоотрицательности $\lambda_{\text{мс}}$, представляющий собой отношение линейного размера образца в магнитном поле к соответствующему его размеру в отсутствие этого поля, для ряда материалов при напряженности поля $H=400 \text{ A/cm}$:

Никель	$-50 \cdot 10^{-6}$ (сжатие)
Сплав 50%Fe + 50%Co	$+60 \cdot 10^{-6}$ (растяжение)
„ 85%Fe + 15%Al	$+30 \cdot 10^{-6}$
„ 54%Pt + 46%Fe	$+10^{-4}$

В последнее время найден состав ферритов, у которых $\lambda_{мс} = 10^{-2}$ при высоких напряженностях магнитного поля.

Если образовать двухслойный элемент из материалов с выраженной отрицательной и положительной *магнитострикцией*, то такой биметалл будет изгибаться в магнитном поле. Это явление использовано для построения расцепителей. В магнитном поле, создаваемом током защищаемой цепи, размещен биметаллический элемент, свободный конец которого при повышенном токе изгибается и воздействует на соответствующую деталь автомата, вызывая его отключение.

В современных автоматических выключателях находят применение также *полупроводниковые расцепители*. В сравнении с электромеханическими они обеспечивают более высокую точность параметров срабатывания (по току — до 10%, по времени — до 20%). Они представляют статические устройства, состоящие из ряда полупроводниковых блоков. Выходной сигнал с них поступает на независимый расцепитель (отключающую катушку) автомата. Структурная схема полупроводникового расцепителя дана на рис. 4-17.

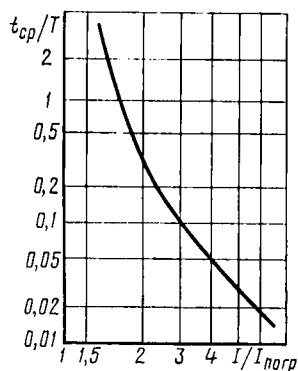


Рис. 4-16. Защитная характеристика автомата

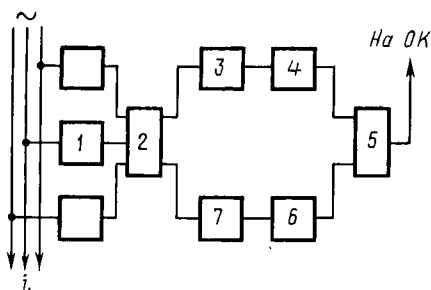


Рис. 4-17. Структурная схема полупроводникового расцепителя

Блок 1 измеряет ток i защищаемой установки. Блок 2 анализирует сигнал от блока 1. Если этот сигнал соответствует току перегрузки, из блока 2 поступает пропорциональный току i сигнал на блок 3, который запускает полупроводниковые реле (блок 4). Оно создает зависимость от тока i выдержку времени (кривая 2 на рис. 4-14 — участок б—г). При токе короткого замыкания сигнал с блока 2 достаточен для запуска блока 7, выпол-

няющего функции реле максимальной отсечки и вырабатывающего сигнал мгновенного срабатывания. Блок 6 при необходимости создает некоторое постоянное время задержки срабатывания расцепителя, что необходимо при кратковременном (самостоятельно исчезающем) коротком замыкании. Автомат «ждет», пока оно исчезнет и не отключает напряжение с установки мгновенно. Блок 5 усиливает поступившие от блоков 4 и 6 сигналы и подает импульс на отключающую катушку ОК автомата.

Блоки 1 строятся на основе трансформаторов тока при переменном токе или на основе трансформаторов постоянного тока (дроссельные магнитные усилители). В полупроводниковом реле времени 4 в качестве времязадающего элемента использована R-C-цепочка. Время заряда или разряда конденсатора и соответственно время срабатывания реле регулируется изменением R и C (постоянная времени $\tau_s = RC$).

Принципиальная схема полупроводникового расцепителя для автомата защиты от токов короткого замыкания показана на рис. 4-18. Отключение осуществляется мгновенно. Выпрямленное по мостовой схеме выпрямителя В напряжение вторичных обмоток трансформаторов тока ТТ, пропорционально току защищаемой цепи, подается на резистор R1, изменением которого регулируется установка по току срабатывания. Во включенном состоянии транзистор ТР заперт напряжением, подаваемым на его базу с участка а—б потенциометра R2. Поэтому тока на управляющем электроде тиристора

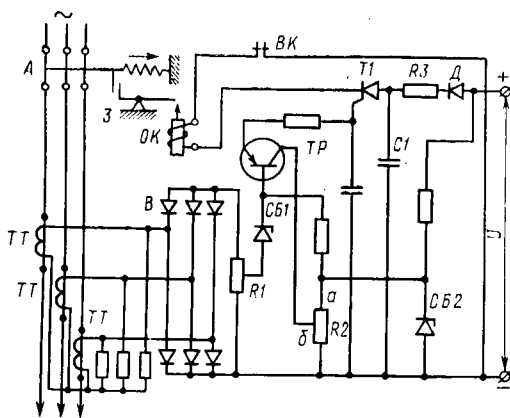


Рис. 4-18. Схема полупроводникового расцепителя

Т1 нет и он также закрыт. Конденсатор С1 через диод Д и резистор R3 заряжен до напряжения U.

Если ток в защищаемой цепи повышается до уровня уставки срабатывания, возрастает напряжение на резисторе R1 и пробивается стабилитрон СБ1. Транзистор ТР открывается и подает управляющий ток на тиристор Т1. Он открывается и обеспечивает цепь для разряда конденсатора С1 на отключающую

катушку ОК автомата А, в результате чего защелка З перестает удерживать автомат и он отключает возникший сверхток в защищаемой силовой цепи. Цепь тока разряда через ОК разрывается вспомогательными контактами ВК. Стабилизатор СБ2 способствует поддержанию постоянного напряжения на соответствующих элементах схемы.

В автоматах серии А3700 и Э («Электрон») применяются полупроводниковые расцепители, которые обеспечивают как зависимость от времени часть характеристики (участок $a-b$ на рис. 4-14), так и отсечку (участок $b-z$). Их функциональные узлы построены на основе транзисторов [16]. Их параметры приведены в табл. 4-2.

Т а б л и ц а 4-2

Автомат	$I_{ном}, A$	$I_{н.р}, A$	$I_{ср.п}, A$	t_{max}, c	$t_{ср.п}, c$	$t_{ср.к.з}, c$	$I_{отс}, A$
Э	До 6300	250—6300	$0,8-2,0I_{н}$	200	4—16	$0,25-0,7$	$4-12I_{ном}$
А 3700	160—630	20—630	$0,5-1,2I_{н}$	600	4—16	$0,1-0,4$	$2-10I_{ном}$

Обозначения: $I_{ном}$ — номинальный ток автомата, А; $I_{н.р}$ — номинальный ток расцепителя, А; $I_{ср.п}$ — пределы регулировки тока срабатывания в зоне перегрузки, А; t_{max} — максимальная выдержка времени, с; $t_{ср.п}$ — пределы уставки выдержки времени (задаваемой выдержки времени) в зоне токов перегрузки, с; $t_{ср.к.з}$ — возможная уставка времени в зоне тока короткого замыкания, с; $I_{отс}$ — пределы регулировки тока отсечки, А.

§ 4-5. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Быстродействующие автоматические выключатели представляют особую группу аппаратов, используемых преимущественно для защиты преобразовательных установок. Среди них различают автоматы обратного тока, предназначенные для отключения поврежденного параллельно работающего преобразователя постоянного тока при изменении в нем направления тока; линейные автоматы, осуществляющие токовую защиту установок постоянного тока от перегрузок и коротких замыканий при прямом направлении тока, и др. Различают также поляризованные автоматы, срабатывающие только при одном направлении тока, и неполяризованные автоматы, работающие независимо от направления тока.

Отличительная особенность этих автоматов — быстродействие. Быстрое размыкание контактов при возникновении аварийного режима в сети определяет другую особенность автоматов, которое проявляется в том, что сопротивление, рано появляющееся на контактах электрической дуги, включенное последовательно в отключаемую цепь, ограничивает ток короткого замыкания, не давая ему возрасти до установившегося значения. На рис. 4-19 изображены кривые изменения тока при отключении короткого замыкания быстродействующим 1 и обычным 2 автоматами. Ограниченный ток $I_{огр}$ может быть в несколько раз меньше установившегося тока короткого замыкания $I_{у.к.з}$, что улучшает условия гашения дуги и создает на аппарате существенно меньшую электродинамическую и термическую нагрузки.

Быстродействующие автоматы разрабатываются на большие номинальные токи, измеряемые тысячами ампер; это обуславливает

достаточно большие габариты их контактных систем и токоведущих частей. Тем не менее для обеспечения быстродействия стремятся максимально уменьшить массу подвижных деталей автомата. Кроме того, в быстродействующих автоматах обычно нет промежуточных передаточных механических звеньев от отключающего электромагнита (или пружины) до подвижного контакта. Нередко якорь электромагнита механически жестко связывается с контактом. Применение интенсивных дугогасительных устройств в этих автоматах резко сокращает длительность горения дуги при отключении цепи. В быстродействующих автоматах избегают применения короткозамкнутых обмоток и нешихтованных магнитопроводов на путях изменяющихся магнитных потоков, чтобы избежать замедляющего влияния вихревых токов.

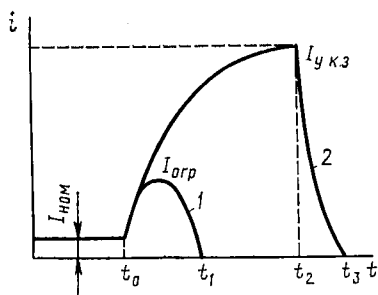


Рис. 4-19. Кривые изменения тока при отключении короткого замыкания

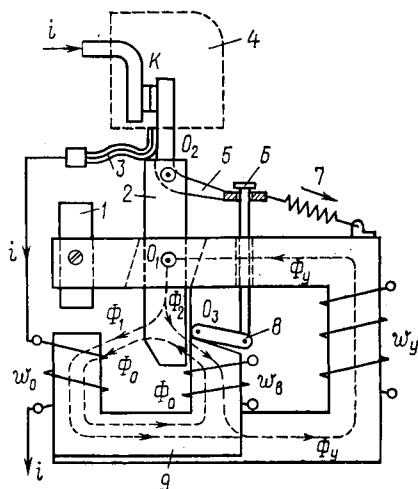


Рис. 4-20. Схема быстродействующего автомата

Быстродействие рассматриваемых автоматов может достигаться путем применения специальных магнитных систем (рис. 4-20). На магнитопроводе размещены три обмотки — отключающая w_0 , включающая $w_в$ и удерживающая $w_у$. Отключающая катушка включена последовательно с главными контактами K и гибкой связью 3. При замкнутом состоянии контактов по цепи проходит ток i . Положение узлов, изображенное на рисунке, соответствует включенному состоянию автомата. Якорь 2 нижним концом прижат к среднему керну и удерживается в этом положении за счет составляющей Φ_2 магнитного потока $\Phi_у$, создаваемого удерживающей катушкой $w_у$, включенной на постоянное напряжение. Тогда $\Phi_у = \Phi_1 + \Phi_2$ и $\Phi_2 \gg \Phi_1$, так как сопротивление воздушного зазора для потока Φ_2 (справа от якоря) значительно меньше сопротивления зазора для потока Φ_1 (слева от якоря). Подвижный контакт укреплен на верхнем конце якоря 2 и может вращаться вокруг оси O_2 . В изображенном положении он прижат к неподвижному контакту силой пружины 7.

Если ток i главной цепи невелик, то создаваемый катушкой ω_0 магнитный поток Φ_0 незначителен в сравнении с потоками Φ_1 и Φ_2 , создаваемыми удерживающей катушкой, и не оказывает влияния на положение якоря. Если же в защищаемой цепи возникает короткое замыкание и ток i начинает увеличиваться, то и поток Φ_0 возрастает. Результирующий поток в левом по отношению к якорю зазоре ($\Phi_1 + \Phi_0$) возрастет, а в правом зазоре ($\Phi_2 - \Phi_0$) — уменьшется. В момент достижения равенства потоков, т. е. когда $\Phi_1 + \Phi_0 = \Phi_2 - \Phi_0$, якорь 2 перебрасывает с помощью пружины 7 от среднего к левому полюсу (вращение вокруг оси O_1). При этом автомат отключается и возникшая на контактах K дуга в дугогасительной камере 4 гасится. Когда прохождение тока по цепи прекращается, якорь остается в том же положении, так как поток Φ_1 от удерживающей катушки перераспределителя между зазорами становится больше Φ_2 .

Переброс якоря 2 из положения включенного автомата в положение отключенного происходит быстро. Этому способствует специфика воздействия на него электромагнитных сил: сила, осуществляющая отключение автомата и определяемая суммой потоков Φ_1 и Φ_2 , нарастает во времени, а удерживающая сила, определяемая разностью потоков Φ_2 и Φ_0 , уменьшается. Этот дифференциальный принцип воздействия электромагнитных сил на якорь электромагнита в электрических аппаратах часто используется для уменьшения их времени срабатывания.

Для включения автомата подают напряжение на обмотку включающей катушки ω_b , которая создает магнитный поток, противоположный по направлению потоку Φ_0 . Результирующий поток от включающей и удерживающей катушек в левом по отношению к якорю зазоре уменьшается, а в правом зазоре — увеличивается. Нижний конец якоря переходит от левого к среднему полюсу, т. е. якорь 2 занимает положение, в котором он изображен на рисунке. Но автомат при этом полностью еще не включается. Часть потока, созданного включающей катушкой, замыкается через специальный якорь 8, который притягивается к полюсу, переместившись своим правым концом вниз (вращение вокруг оси O_3). Создается механическое усилие, которое через деталь 6 удерживает в нижнем положении конец рычага 5, связанного с контактами K , и не дает им включиться. Когда снимается напряжение с включающей катушки и исчезает создаваемый ею поток, контактный рычаг 5 поворачивается на некоторый угол вокруг оси O_2 за счет силы пружины 7, контакты K замыкаются и автомат включается.

Описанное устройство позволяет предотвратить так называемое прыгание автомата при включении его на существующее в цепи короткое замыкание. Допустим, что дополнительного якоря 8 и детали 6 в автомате нет. Тогда при перебросе якоря 2 к среднему полюсу сразу замыкаются контакты K и по цепи идет ток i . Если это ток короткого замыкания, то за счет потока Φ_0

от катушки ω_0 автомат немедленно отключается. Если напряжение с включающей катушки к этому моменту не снято, то автомат снова включается. В условиях прохождения тока короткого замыкания автомат постоянно отключается и включается, что может привести к его разрушению. Устройство с якорем 8 предотвращает возможность такой аварии, так как создает условия, при которых автомат отключается лишь один раз при включении его на существующее в сети короткое замыкание. При отключении якорь 8 также может притянуться к среднему полюсу, что способствует ускорению процесса отключения автомата.

Участок 9 магнитопровода изготовлен из шихтовой стали, чтобы снизить вихревые токи, вызванные изменяющимся во времени магнитным потоком Φ_0 , и устранить их влияние на процесс нарастания этого потока. Быстродействие автомата повышается.

Фактический характер распределения потоков в магнитопроводе более сложный, чем на рисунке. Через воздушный зазор над левым полюсом также замыкаются потоки, которые не показаны на рисунке. Этот зазор регулируется путем изменения положения дополнительного полюса 1. Смещая этот полюс вниз или вверх, можно перераспределять потоки в магнитопроводе. В частности, так можно изменить величину потока Φ_0 , замыкающегося на якорь 2, и регулировать этим уставку тока срабатывания автомата. При неизменной магнитодвижущей силе отключающей катушки смещение полюса 1 вниз приводит к увеличению тока срабатывания.

Отечественные быстродействующие автоматы условно обозначаются индексом ВАБ. Для примера, один из таких аппаратов

ВАБ-43-2000/10Л имеет такие паспортные данные: номинальный ток 2000 А, номинальное напряжение 1500 В, полное время отключения аварийного тока 0,015 с, пределы регулирования минимального тока срабатывания 1000—4000 А. Замкнутые обмотки, сцепленные с изменяющимся магнитным потоком, замедляют срабатывание автомата. В автомате (рис. 4-20) при нарастании отключающего потока Φ_0 для этого служат обмотки ω_v и ω_y . Рассмотрим зависимости, позволяющие сделать количественную оценку этого влияния.

На рис. 4-21 показана схема П-образного электромагнита с двумя обмотками. Обмотка ω_1 включена в цепь

главного тока. Пусть ток в этой цепи нарастает по закону $i_1 \approx (di/dt)_0 t$, что соответствует начальному участку кривой тока короткого замыкания. Созданный ток i_1 изменяющийся магнитный поток наводит в обмотке ω_2 ЭДС

$$e_2 = -\omega_2'(d\Phi/dt) = i_2''R, \quad (4-19)$$

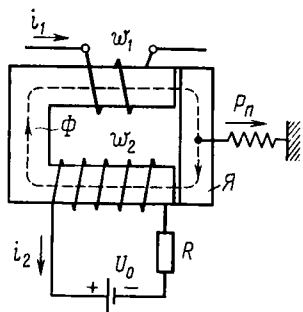


Рис. 4-21. Схема удерживающего электромагнита автомата

где i_2'' — составляющая тока (Λ), в обмотке w_2 , вызванная ЭДС, В; R — активное сопротивление цепи обмотки w_2 , Ом.

Влияние индуктивности обмотки w_2 и определяемого ею индуктивного сопротивления в переходном режиме здесь не учитываются. При нарастающем токе i_1 результирующий поток Φ в магнитопроводе уменьшается (потоки от катушек w_1 и w_2 направлены встречно). Если создаваемая результирующим потоком Φ электромагнитная сила притяжения якоря меньше силы противодействующей пружины $P_{\text{п}}$, то якорь отходит вправо и автомат отключается.

Результирующий поток в магнитопроводе (без учета рассеяния)

$$\Phi = (1/R_M) [(i_2' + i_2'')w_2 - i_1w_1] = (1/R_M) [(U_0/R)w_2 + i_2''w_2 - (di/dt)_0w_1t]. \quad (4-20)$$

Магнитное сопротивление $R_M \approx R_{\text{ст}} + R_{\delta}$, где $R_{\text{ст}}$ — магнитное сопротивление стали, $1/\text{Гн}$; R_{δ} — магнитное сопротивление воздушного зазора, $1/\text{Гн}$.

В выражении (4-20) первая составляющая тока i_2' в обмотке w_2 представляет собой установившееся значение тока, обусловленное напряжением U_0 и сопротивлением R . Так как для отпущения якоря при возникновении короткого замыкания в цепи тока i_1 необходимо, чтобы результирующий поток уменьшался, то знак составляющей МДС $i_2'w_2$ должен быть противоположен знаку МДС i_1w_1 . Это определено выбором полярности обмоток w_1 и w_2 . При нарастающем токе i_1 наведенный ток i_2'' магнитный поток в соответствии с принципом инерции Ленца должен иметь направление, противоположное потоку от i_1 . Поэтому МДС $i_2''w_2$ по знаку также противоположна МДС i_1w_1 .

Продифференцируем уравнение (4-20) по времени:

$$d\Phi/dt = (1/R_M) [w_2 di_2''/dt - (di/dt)_0w_1]. \quad (4-21)$$

Подставив (4-21) в (4-19), получим

$$(di_2''/dt) + RR_M i_2''/w_2^2 = (di/dt)_0w_1/w_2.$$

Решение этого уравнения при начальном условии $t = 0$ и $i_2' = 0$ имеет вид

$$i_2'' = [(di/dt)_0w_1w_2/(RR_M)] [1 - \exp(-RR_M t/w_2^2)].$$

Результирующий ток в обмотке w_2 :

$$i_2 = i_2' + i_2'' = (U_0/R) + [(di/dt)_0w_1w_2/(RR_M)] [1 - \exp(-RR_M t/w_2^2)].$$

Результирующая магнитодвижущая сила:

$$\begin{aligned} (i\omega)_{\Sigma} &= i_2w_2 - i_1w_1 = (i_2' + i_2'')w_2 - i_1w_1 = \\ &= \left\{ \frac{U_0}{R} + \frac{(di/dt)_0w_1w_2}{RR_M} \left[1 - \exp\left(-\frac{RR_M}{w_2^2}t\right) \right] \right\} w_2 - (di/dt)_0w_1t. \end{aligned} \quad (4-22)$$

Для реальных электромагнитных устройств быстродействующих автоматов при значениях времени срабатывания, измеряемых тысячными долями секунды,

$$1 - \exp(-RR_M t/w_2^2) \approx 0,01.$$

Тогда выражение (4-22) приобретает вид

$$(i\omega)_{\Sigma} = \frac{U_0}{R} w_2 + 0,01 \frac{(di/dt)_0w_1w_2}{RR_M} - (di/dt)_0w_1t. \quad (4-23)$$

Момент трогания якоря электромагнитного устройства наступает при равенстве электромагнитной $P_{\text{эм}}$ и противодействующей $P_{\text{п}}$ сил. Если электромагнитную силу выразить зависимостью (4-15), то

$$P_{\text{эм}} = (-\Phi_{\text{ср}}^2 R_{\delta}^2 / 2) (d/d\delta) (1/R_{\delta}) = P_{\text{п}}, \quad (4-24)$$

где $\Phi_{\text{ср}}$ — поток срабатывания, Вб; R_{δ} — магнитное сопротивление воздушных зазоров, $1/\text{Гн}$; δ — рабочий зазор, м.

Отсюда

$$\Phi_{\text{ср}} = \frac{1}{R_{\delta}} \sqrt{\frac{2P_{\text{п}}}{[(-d/d\delta) (1/R_{\delta})]}}.$$

Для определения времени нарастания потока до $\Phi_{\text{ср}}$ (времени трогания $t_{\text{тр}}$) из (4-23) и (4-24) получаем соотношение

$$\begin{aligned} (i\omega)_{\text{ср}} = \Phi_{\text{ср}} R_M &= \frac{R_M}{R_{\delta}} \sqrt{\frac{2P_{\text{п}}}{[(-d/d\delta) (1/R_{\delta})]}} = \\ &= \frac{U_0}{R} \omega_2 + 0,01 \frac{(di/dt)_0 \omega_1 \omega_2^2}{RR_M} - (di/dt)_0 \omega_1 t_{\text{тр}}. \end{aligned}$$

Отсюда время трогания

$$\begin{aligned} t_{\text{тр}} &= \frac{U_0 \omega_2}{R \omega_1 (di/dt)_0} + \frac{0,01 \omega_2^2}{RR_M} - \\ &- \frac{R_M}{R_{\delta} \omega_1 (di/dt)_0} \sqrt{\frac{2P_{\text{п}}}{[(-d/d\delta) (1/R_{\delta})]}}. \end{aligned} \quad (4-25)$$

Вторая составляющая в (4-25) определяется влиянием замкнутой обмотки ω_2 , с которой сцеплен изменяющийся во времени магнитный поток.

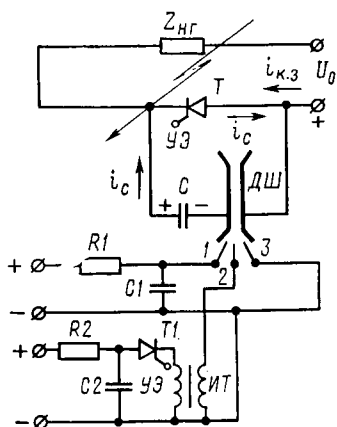


Рис. 4-22. Схема импульсного дугового коммутатора

Быстродействующие автоматы могут использоваться для защиты силовых полупроводниковых установок от сверхтоков.

Известно, что полупроводники не могут выдерживать токи короткого замыкания. Прохождение по ним 10—20-кратного тока по отношению к номинальному возможно лишь в течение времени не более 0,01 с. Поэтому создаются специальные быстродействующие аппараты, которые предупреждают силовые тиристорные установки от разрушения токами короткого замыкания. Вариант такого аппарата дан на рис. 4-22. Вместо инерционных электромеханических элементов в нем использована безынерционная электрическая дуга. Допустим, что от

сверхтока необходимо защитить тиристор T . Для этого используется предварительно заряженный конденсатор C , который при переключении дуговых шин электрической дуги создает ток разряда i_c , противоположный току $i_{к.з}$ короткого замыкания. Результа-

рующий ток через тиристор T сводится к нулю и он запирает цепь тока (управляющий сигнал с его электрода УЭ должен быть снят).

Схема работает в такой последовательности. При возникновении короткого замыкания, когда сопротивление нагрузки $Z_{нг}$ оказывается зашунтированным, возникает большой ток $i_{к.з} \gg i_{ном} = U_0/Z_{нг}$. Тогда от преобразователя тока на управляющий электрод тиристора $T1$ поступает сигнал для открытия. Конденсатор $C2$ разряжается, на вторичной обмотке импульсного трансформатора ИТ создается импульс напряжения, который пробивает промежуток 2—3. Возникающая дуга перебрасывается на электрод 1 и переключает электроды 1—3. Разряд конденсатора $C1$ вызывает появление более мощной дуги, которая перекидывается на дуговые шины ДШ. При этом замыкается цепь разряда конденсатора C на защищаемый тиристор T . Ток разряда конденсатора i_C нарастает с некоторой скоростью (цепь всегда содержит индуктивность) и он противоположен по знаку току короткого замыкания $i_{к.з}$. Результирующий ток через тиристор $T1$ быстро снижается, и когда он становится равным нулю, тиристор закрывается. Отпирающий сигнал с его управляющего электрода УЭ должен быть снят. Резисторы $R1$ и $R2$ служат для ограничения тока на соответствующих участках схемы.

В качестве быстродействующих используются также автоматические выключатели, основанные на электродинамическом принципе действия, описанные ниже.

§ 4-6. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

Применяются автоматические выключатели (автоматы), основанные на взаимодействии друг с другом двух или нескольких участков тока. В одном случае взаимодействуют токи, идущие по обмоткам или шинам (электродинамические системы). В другом случае взаимодействует ток обмотки с током, наведенным в металлическом диске (индукционно-динамическое устройство). Имеются автоматы, в которых ток одной обмотки взаимодействует с магнитным полем, созданным другой обмоткой, причем для усиления этого поля применен стальной магнитопровод (ферродинамические системы). Так как во всех этих видах автоматов происходит взаимодействие магнитных полей, созданных токами, то условно назовем их электродинамическими. Их отличительные особенности — малое время срабатывания и ограничение тока короткого замыкания.

Устройство наиболее простого электродинамического автомата показано на рис. 4-23. Токоведущие детали 1 и 2 расположены близко друг к другу, благодаря чему при прохождении токов i увеличиваются силы электродинамического взаимодействия между ними. Кроме того, при изменяющемся токе близкое расположение токоведущих частей приводит к усилению эффекта близости.

Характер магнитных полей вокруг проводников с токами разного направления показывает, что в обращенных друг к другу частях сечений проводников плотность тока максимальная. Следовательно, благодаря эффекту близости электрические оси токов приближаются друг к другу и электродинамические силы в переходном режиме нарастания тока увеличиваются.

Если механический момент, создаваемый электродинамическими силами между деталями 1 и 2, превышает противодействующий момент от пружины P_1 , то деталь 1 перемещается в верхнее положение, контакты K размыкаются и выключатель разрывает цепь тока i . При этом защелка 3 под действием силы P_2 удерживающей пружины встает за выступ 4 и автомат остается в отключенном состоянии.

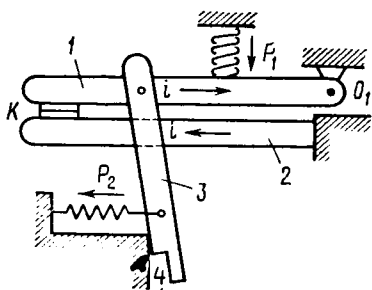


Рис. 4-23. Токоведущая система автомата электродинамического типа

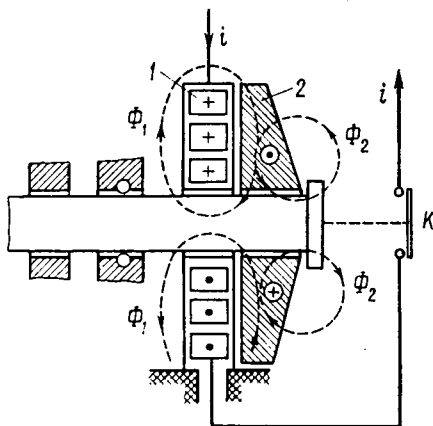


Рис. 4-24. Схема автомата индукционно-динамического типа

Эти автоматы имеют несколько разновидностей. Так, имеется двухступенчатый автомат, в котором на внутренних поверхностях деталей 1 и 2 имеются параллельные главным, но изолированные от них дополнительные токоведущие шины, снабженные своими дополнительными контактами. Если размыкаются главные контакты K , весь ток переходит в дополнительные шины, контакты которых остаются замкнутыми. Эти шины расположены ближе друг к другу по сравнению с главными, поэтому электродинамические силы увеличиваются. Дополнительные шины имеют небольшое сечение, так как рассчитываются на кратковременное прохождение тока.

В другой разновидности автоматов с электродинамическим отключением параллельно неподвижной токоведущей детали 2 включается дополнительная шина, представляющая собой индуктивный шунт (на нее надет пакет стали). В установившемся режиме ток проходит через главную и дополнительную шины. В режиме короткого замыкания, когда ток резко возрастает, почти весь ток переходит в главную шину благодаря возросшему индуктивному (в переходном процессе) сопротивлению шунта. С увели-

чением производной тока во времени возрастает сопротивление шунта и падение напряжения на нем.

Схема автомата, основанного на индукционно-динамическом принципе, показана на рис. 4-24. В цепь главного тока включена обмотка 1. При нарастании тока короткого замыкания и соответствующем изменении создаваемого им магнитного потока Φ наводятся вихревые токи в диске 2, расположенном рядом с обмоткой. В соответствии с принципом инерции Ленца наведенный ток в диске и созданный им магнитный поток имеют противоположные направления в сравнении с главным током и потоком. Основная часть магнитных потоков замыкается по кратчайшим путям, т. е. через пространство между обмоткой и диском. Возникает отталкивающая сила, которая отбрасывает вправо диск 2 и связанную с ним подвижную систему. Эта сила оказывается достаточно большой, так как при перемещении диска вправо величины взаимодействующих потоков Φ_1 и Φ_2 увеличиваются. Контакты K размыкаются, и цепь тока отключается.

Для вычисления отталкивающего усилия в этом автомате можно использовать уравнение

$$P = dW/dx = i_1 i_2 dM/dx, \quad (4-26)$$

где i_1 и i_2 — токи во взаимодействующих элементах, А; M — их взаимная индуктивность, Гн; x — координата в направлении перемещения подвижной системы, м.

Если пренебречь усилием противодействующих пружин, то сила P по закону Ньютона равна произведению массы m на ускорение, т. е. на производную скорости v по времени t :

$$i_1 i_2 dM/dx = m dv/dt = m v dv/dx. \quad (4-27)$$

На основе этого выражения можно определить время срабатывания автомата.

Кроме последовательного (рис. 4-25) возможны другие варианты включения индукционно-динамического автомата в защищаемую сеть, например варианты включения его обмотки параллельно индуктивному шунту $L_{ш}$ (рис. 4-25, а) и с разрядом конденсатора C , заряжаемого до напряжений U_C , на его обмотку (рис. 4-25, в). В варианте а большая скорость нарастания тока короткого замыкания i вызывает резкое возрастание динамического сопротивления шунта (и напряжения на нем $L_{ш} di/dt$). Основной ток переходит в обмотку K (ток i_K), вызывая отталкивание диска D от неподвижной катушки и размыкание контактов вследствие взаимодействия тока i_K обмотки K с наведенным током i_d в диске. В варианте в измерительный элемент ИЭ выдает пропорциональный скорости нарастания тока сигнал на управляющий орган УО, который при коротком замыкании в сети включает цепь-разряда конденсатора C на катушку. Резкое нарастание тока разряда i_K вызывает появление индукционного тока i_d в диске, отталкивание диска от катушки и отключение автомата [14].

На рис. 4-25, б, г изображены схемы замещения рассматриваемых вариантов. Здесь $R_{нг}$ и $L_{нг}$ — активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $R_{ш}$ и $L_{ш}$ — аналогичные параметры индуктивного шунта; R_k и L_k — аналогичные параметры обмотки; R_d и L_d — активные сопротивления и индуктивность вторичного контура (диска); M — взаимоиндуктивность обмотки и диска; R_y и R_n — сопротивление объекта УО и проводов контура.

Общее уравнение движения подвижной системы автомата имеет вид

$$md^2x(t)/dt^2 = P_{эд}(t) - P_c(x), \quad (4-28)$$

где m — масса подвижной системы, кг; x — ее ход, м; $P_{эд}$ и P_c — электродинамическая сила взаимодействия обмотки с диском и сила сопротивления, Н.

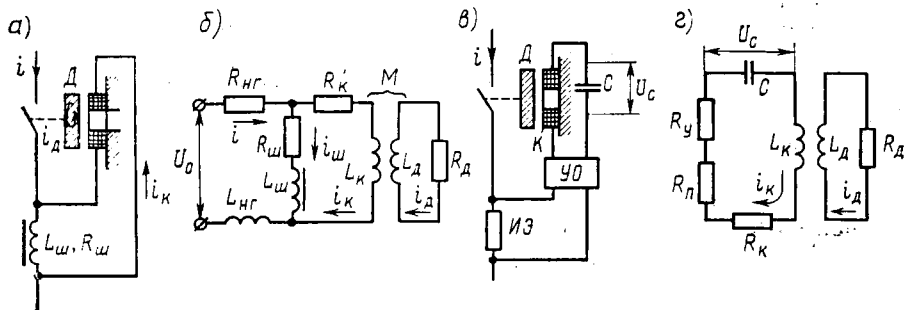


Рис. 4-25. Варианты включения индукционно-динамического автомата

С учетом (4-26) уравнение (4-28) приобретает вид

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t [P_{эд}(t) - P_c(t)] dt dt = \\ &= \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t \left[i_k i_d \frac{dM(x)}{dx} - P_c(x) \right] dt dx. \end{aligned} \quad (4-29)$$

Для варианта (рис. 4-25, а) система уравнений схемы замещения (рис. 4-25, б) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} i_d R_d(\omega, i_d) + L_d(\omega) di_d/dt + M(x) di_k/dt &= 0; \\ i_k R_k + L_k di_k/dt + M(x) di_d/dt - i_{ш} R_{ш} - L_{ш}(i_{ш}) di_{ш}/dt &= 0; \\ i R_{нг} + L_{нг} di/dt + i_{ш} R_{ш} + L_{ш}(i_{ш}) di_{ш}/dt &= U_0; \\ i &= i_{ш} + i_k, \end{aligned} \right\} \quad (4-30)$$

где ω — угловая частота.

Система уравнений для варианта (рис. 4-25, в) и его схемы (рис. 4-25, г):

$$\left. \begin{aligned} i_k [R_k + R_n + R_y(i_k)] + L_k di_k/dt + M(x) di_d/dt + U_c &= 0; \\ i_d R_d(\omega, i_d) + L_d(\omega) di_d/dt + M(x) di_k/dt &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4-31)$$

Установлено, что без большой погрешности для реальных устройств можно принять следующие допущения: сопротивления R_d и R_y не зависят от протекающих через них токов; распределение тока в диске равномерное.

Решение системы (4-30) и (4-31) проводится методом численного интегрирования, когда на каждом шаге величины $L_{ш}$, M , dM/dx и P_c принимаются постоянными [1]. Для этого сначала рассчитывают зависимости $M(x)$ и $dM(x)/dt$ и экспериментально определяют $L_{ш}(i_{ш})$. Нагрузочная характеристика $P_c(x)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией. Тогда (4-30) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} i_d R_d + L_d di_d/dt + M di_k/dt &= 0; \\ i_k R_k + L_k di_k/dt + M di_d/dt - i_{ш} R_{ш} - L_{ш} di_{ш}/dt &= 0; \\ i R_{шг} + L_{шг} di/dt + i_{ш} R_{ш} + L_{ш} di_{ш}/dt &= U_0; \\ i &= i_k + i_{ш}. \end{aligned} \right\} \quad (4-32)$$

Начальные условия для решения:

$$t = 0 - i_d = 0, i_{ш} = 0, i_k = 0, x = 0, dx/dt = 0.$$

В матричной форме преобразования система (4-32) имеет вид

$$\begin{vmatrix} 0 & L_d & M \\ -L_{ш} & M & L_k + L_{ш} \\ L_{шг} + L_{ш} & 0 & -L_{ш} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} di/dt \\ di_d/dt \\ di_k/dt \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{vmatrix}, \quad (4-33)$$

где $A_1 = -i_d R_d$; $A_2 = i R_{ш} - i_k (R_{ш} + R_k)$; $A_3 = U_0 + i_k R_{ш} - i (R + R_{ш})$.

Производные токов (по правилу Крамера) равны

$$di/dt = \Delta_1/\Delta; di_d/dt = \Delta_2/\Delta; di_k/dt = \Delta_3/\Delta,$$

где $\Delta = L_{ш} L_d L_{шг} + (L_{шг} + L_{ш})(L_d L_k - M^2)$; $\Delta_1 = -A_1 L_{ш} M + (A_2 + A_3) B_2 + A_3 B_3$; $\Delta_2 = -A_1 B_1 M + A_2 B_1 L_d + A_3 B_2$; $\Delta_3 = A_1 (L_k B_1 + L L_{ш}) - A_2 B_1 M - A_3 L_{ш} M$; $B_1 = L_{шг} + L_{ш}$; $B_2 = L_d L_{шг}$; $B_3 = L_d L_k - M^2$.

Токи, силы и перемещения можно вычислить численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным шагом.

Другая система уравнений (4-31) при вышеизложенных допущениях после преобразований приобретает вид

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= v; dv/dt = (1/m)[i_d i_k dM/dx - P_c]; \\ di_k/dt &= y; di_d/dt = z; \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{M R_d z - L_d [(i_k/C) + R_{ко} y]}{L_k L_d - M^2}; \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{L_k R_d z - M [(i_k/C) + R_{ко} y]}{M^2 - L_k i_d}; \\ R_{ко} &= R_k + R_y + R_{п}. \end{aligned} \right\} \quad (4-34)$$

Начальные условия при решении (4-34): $t = 0 - U_c = U_c$; $i_k = 0$; $i_d = 0$; $x = 0$; $v = 0$.

В конкретных условиях расчета, когда заданы параметры эквивалентных схем, зависимости $P_c(x)$, $M(x)$, $L_{ш}(i_{ш})$, за расчетные параметры можно принять величину шага, предельные значения координаты и времени, соответствующие окончанию процесса срабатывания (критерии окончания счета). Характер зависимостей $P_{эд}(t)$, $i_k(t)$ и $x(t)$ для системы с емкостным накопителем дан на рис. 4-26.

Ферродинамический автомат (рис. 4-27) имеет магнитную систему, в которой намагничивающая обмотка w_2 , включаемая под напряжение U_0 , создает магнитное поле Φ в воздушном зазоре. В этом поле размещается подвижная обмотка w_1 , жестко связанная с контактами K и включаемая последовательно в цепь тока i защищаемой сети. При токе короткого замыкания создаются большие силы взаимодействия тока i в обмотке w_1 с полем Φ , которые выталкивают катушку вверх и размыкают контакты K .

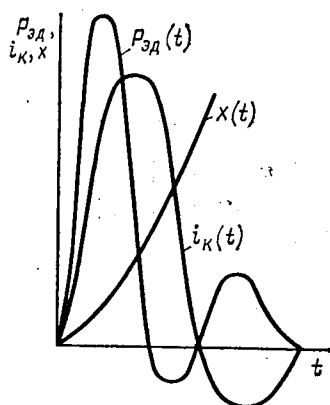


Рис. 4-26. Зависимости для индукционно-динамического автомата с емкостным накопителем

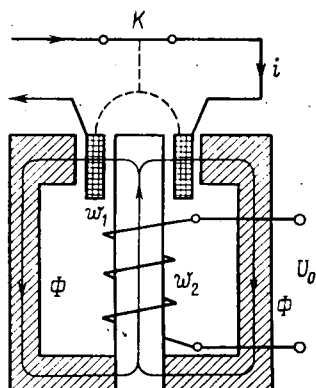


Рис. 4-27. Ферродинамический автомат

§ 4-7. АВТОМАТЫ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Гашением поля называют процесс быстрого сведения к нулю магнитного поля возбуждения электрических машин. Обычно нельзя быстро осуществить простое отключение цепи тока возбуждения генератора, так как в ней появляются большие перенапряжения, пропорциональные произведению индуктивности обмотки возбуждения на скорость спада тока. Эти перенапряжения способны вызвать пробой изоляции, так как индуктивности обмоток возбуждения генераторов высоки (до 10 Гн). Чтобы быстро прервать цепь тока возбуждения (до 10 кА) и не вызвать при этом недопустимых перенапряжений, энергию магнитного поля возбуждения разряжают на какой-либо элемент — конденсатор, линейное и нелинейное сопротивление и т. п.

Рассмотрим зависимости, относящиеся к условиям гашения поля на разрядное сопротивление R_p (рис. 4-28, а). Параллельно обмотке возбуждения 4 генератора, имеющей индуктивность L , активное сопротивление R_b и питающейся от возбудителя 1, при коротком замыкании в статорной цепи генератора подключается разрядное сопротивление R_p и контакты 3 замыкаются. Затем размыкаются контакты 2 и возбудитель 1 отключается от обмотки

возбуждения. Когда обмотка возбуждения оказывается замкнутой на разрядное сопротивление R_p , ток в ней убывает по экспоненциальному закону:

$$i_b = (U_0/R_b) \exp [-(R_p + R_b) t/L].$$

Из этого выражения следует, что для ускорения процесса спада тока целесообразно иметь возможно большее сопротивление R_p . Однако его предел определяется допустимой прочностью электрической изоляции цепи $U_{\max}$. Необходимо, чтобы соблюдалось неравенство:

$$(U_0/R_b) R_p \leq U_{\max} \text{ и } R_p \leq R_b U_{\max}/U_0,$$

где U_0 — напряжение возбудителя.

Если положить, что процесс гашения магнитного поля практически закончится при токе $i_{b,0}$ в обмотке возбуждения, то из приведенной зависимости получим формулу для времени гашения поля:

$$t = [L/(R_p + R_b)] \ln [U_0/(R_b i_{b,0})].$$

Значение тока $i_{b,0}$ соответствует условиям, когда напряжение в обмотке статора, создаваемое током в обмотке ротора, падает примерно до 200 В.

Для процесса гашения магнитного поля справедливо уравнение $L di/dt + (R_b + R_p) i = 0$, из которого получаем $L di/dt = -(R_b + R_p) i$.

В оптимальных условиях произведение индуктивности на производную тока по времени, определяющее перенапряжение в переходном режиме, равно допустимому по уровню изоляции напряжению

$$L di/dt = -(R_b + R_p) i = -U_{\max} = \text{const.}$$

Отсюда $R_b + R_p = \text{const.}/i$. При $R_b \ll R_p$ сопротивление $R_p = \text{const.}/i$.

Следовательно, зависимость разрядного сопротивления от тока в оптимальных условиях должна иметь вид равнобокой гиперболы, а его вольтамперная характеристика $U_p = R_p i = \text{const.}$ Такую характеристику имеет дуга в условиях дугогасительной решетки. Поэтому существуют автоматы гашения магнитного поля, в которых разрядным элементом является электрическая дуга в дугогасительной решетке. Схема замещения такого автомата дана на рис. 4-28, б. Ее элементы: 1 — возбудитель; 2 и 3 — контакты автомата; 4 — обмотка возбуждения генератора; 5 — токоограничивающее сопротивление; 6 — дугогасительная решетка. Элементы схемы работают в такой последовательности: замыкаются контакты 3, включенные последовательно с сопротивлением 5 и размы-

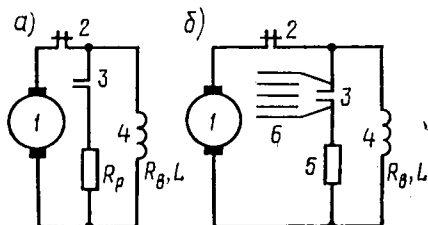


Рис. 4-28. Схема автоматов гашения магнитного поля

На рис. 4-29, *а* изображена конструктивная схема автомата гашения поля серии АГП, работающего по описанному принципу. Когда снимается напряжение с включающего электромагнита ЭМ, контакты 5, жестко связанные с подвижной системой электромагнита, отходят вниз. Между контактами 5 и 6 образуются электрические дуги, которые системой последовательного магнитного

дутья (обмотка 7, сердечник 8, стальные полюса 9) выдуваются вверх. В результате образуется одна дуга, которая силами магнитного дутья загоняется в дугогасительную решетку. С момента образования одной дуги обмотка возбуждения оказывается замкнутой на дугогасительную систему АГП. Войдя на пластины 3 дугогасительной решетки, дуга разбивается на ряд коротких дуг, которые начинают совершать вращательное движение по пластинам. Это вращение вызвано взаимодействием тока дуг с радиальным магнитным полем Φ_n , создаваемым катушками 1 магнитного дутья. Эти катушки оказываются последовательно включенными в цепь с дугой (рис. 4-29, б). Создаваемые ими магнитные поля замыкаются с сердечника 4 на стальной наружный кожух 2. Магнитное поле Φ_n катушек и поле Φ_d от тока дуги расположены так, что с одной стороны столба дуги силовые линии магнитных полей Φ_n и Φ_d имеют одинаковое направление. Плотность результирующего магнитного поля здесь больше, чем с другой стороны столба дуги, где силовые линии рассматриваемых полей направлены встречно. Дуга перемещается в сторону меньшей плотности магнитного поля и совершает вращательные движения по пластинам (рис. 4-29, в).

Включение автомата гашения поля АГП осуществляется электромагнитом ЭМ. Для снижения перенапряжений отдельные участки пластин дугогасительной решетки зашунтированы активными сопротивлениями.

Другим способом гашения поля возбуждения является разряд обмотки возбуждения на конденсатор. Принципиальная схема остается той же (см. рис. 4-28, а), но вместо сопротивления R_p в нее включается постоянная емкость C . Значение разрядной емкости C выбирается такой, чтобы при максимальной энергии ее электрического поля перенапряжение на конденсаторе не превышало допустимого по уровню изоляции $U_{\max}$. Так как при гашении поля вся энергия магнитного поля обмотки возбуждения переходит в электростатическую энергию, действительно соотношение $L(U_0/R_b)^2/2 = C(U_0 + U_{\max})^2/2$. Отсюда необходимая для разряда емкость $C = L(U_0/R_b)^2/(U_0 + U_{\max})^2$.

Если для реальных условий принять $U_0 = 350$ В, $U_{\max} = 5U_0$, $L = 3,2$ Гн, $R = 0,35$ Ом, то $C = 0,75$ Ф. Это очень большая емкость, которую невозможно получить в реальных условиях.

В практике могут использоваться также другие элементы, на которые разряжается обмотка возбуждения. Так, иногда применяется карборундовый резистор, вольтамперная характеристика которого $i = \text{const } u^n$, $n = 3 \div 5$. Применение карборундовых резисторов в качестве разрядных элементов позволяет снизить длительность процесса гашения поля. Но для поддержания стабильности вольтамперной характеристики таких резисторов необходимо снижать допустимую для них плотность тока до очень низких значений ($0,25$ А/см²). При форсировании крупных синхронных машин ток возбуждения может достигать почти 10 кА. Тогда не-

обходимое число дисков оказывается очень большим, что является существенным недостатком данного способа гашения поля.

Гашение поля может осуществляться противовключением возбuditеля, когда с помощью специальных схем изменяется его полярность. В одной из таких схем обмотка возбуждения оказывается включенной в цепь дополнительного активного сопротивления и якоря возбuditеля. Напряжение на последнем принимает направление, обратное тому, которое соответствует току в обмотке возбуждения в момент переключения. Ток в обмотке возбуждения падает примерно по экспоненциальному закону.

§ 4-8. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Отечественная электропромышленность выпускает ряд серий автоматических выключателей на различные номинальные токи и для различных условий эксплуатации (в распределительных устройствах, доступ в которые разрешен лишь обслуживающему персоналу; в бытовых помещениях и др.). Основные серии этих аппаратов таковы: АК-63 на $I_{ном} = 0,63 \div 63$ А; бытовые АВ-25 на $I_{ном} = 15 \div 25$ А; АЕ на $I_{ном} = 10 \div 100$ А; А-3000 на $I_{ном} = 160 \div 630$ А; Э «Электрон» на $I_{ном} = 1000 \div 6300$ А; АВ на $I_{ном} = 1500 \div 7500$ А.

Конструктивная схема одной из серии автоматов А-3000 представлена на рис. 4-30, а. В нем используется так называемый механизм моментного включения и отключения, когда замыкание и размыкание контактов аппарата осуществляется с постоянной скоростью, не зависящей от внешних воздействий. Ручное включение и отключение автомата производится рукояткой 11. Подвижный контакт 6 не замкнут с неподвижным контактом 7. Чтобы включить автомат, надо привести его пружину во взведенное состояние. Для этого рукоятка 11 перемещается вниз и поворачивает на некоторый угол фигурную деталь 10, пока она нижним концом не войдет в зацепление с зубцом 13 удерживающего рычага 14. Автомат окажется готовым к включению (рис. 4-30, б), для чего рукоятка 11 переводится вверх. Пружина 12 вместе с ней перемещается в такое положение, что составляющая ее силы, приложенная к общей точке сочленения рычагов 4 и 5, направляется вверх. Рычаги 4 и 5 переходят за мертвую точку, перемещаются вверх и автомат включается (рис. 4-30, б). Цепь тока оказывается замкнутой (контакты 6 и 7, гибкая связь 3, расцепители 1 и 2).

Автоматическое отключение автомата происходит при срабатывании расцепителей. При токах перегрузки срабатывает биметаллический расцепитель 1. Свободный правый конец биметаллической пластинки перемещается вниз и развиваемая ею сила P_6 поворачивает вокруг оси O_1 удерживающий рычаг 14. Зуб 13 выйдет из зацепления с нижним концом фигурной детали 10. За счет силы пружины 12 эта деталь поворачивается вокруг оси O_2 и рычаги 4 и 5 переходят через мертвое положение и составляю-

щая силы пружины 12 оказывается направленной вниз. Автомат отключается автоматически (рис. 4-30, в, з). То же самое происходит, если срабатывает максимальный расцепитель 2. При токе короткого замыкания его якорь притягивается к неподвижному магнитопроводу, охватывающему токоведущую шину.

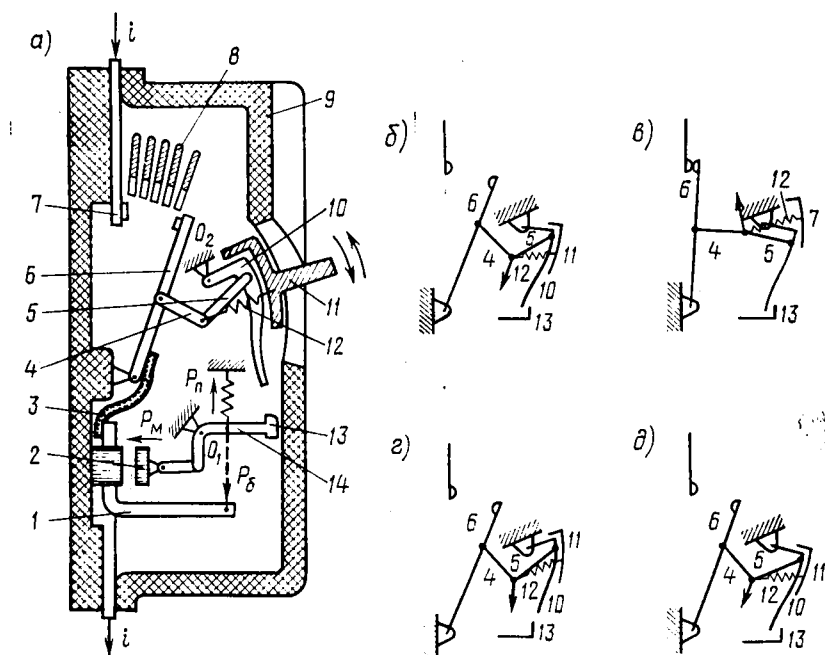


Рис. 4-30. Конструктивная схема автомата А-3000

Для отключения автомата от руки надо переместить вниз рукоятку 11. Правый конец пружины, связанный с рукояткой, также перемещается вниз, в результате чего рычаги 4 и 5 переходят через мертвое положение и автомат отключается (рис. 4-30, д). Возникающая при размыкании контактов автомата электрическая дуга гасится в дугогасительной решетке 8. Повышение давления внутри закрытого объема, образованного изоляционным основанием и крышкой 9, способствует гашению дуги.

На основе автоматов А-3000 создана единая серия А-3700 на напряжение 440 В постоянного и 660 В переменного тока. Она имеет токоограничивающее (ограничение тока короткого замыкания сопротивлением рано возникающей электрической дуги) и селективное (с выдержкой времени соответственно отключаемому току) исполнения. Выпускаются варианты автомата А-3700 с электромагнитными, биметаллическими или полупроводниковыми расцепителями и их сочетаниями. Технические параметры этих автоматов даны в табл. 4-3.

Таблица 4-3

Тип автомата	Номинальный ток, А	Предельный ток отключения (амплитуда) (кА) при напряжении, В		Расцепители
		440	660	

Токоограничивающие

А 37105	160	110	40	Электромагнитные, тепловые и полупроводниковые
А 3720Б	250	110	40	
А 3730Б	400	110	55	
А 3740Б	630	110	55	

Селективные

А 3730С	400	30	50	Полупроводниковые
А 3740С	630	35	60	

Защитные параметры расцепителей автоматов А-3700 и возможности их регулировки следующие: уставка тока срабатывания при перегрузках (от номинального $I_{\text{ном}}$) равна $1,25 I_{\text{ном}}$; уставка тока срабатывания при коротком замыкании $(3 \div 10) I_{\text{ном}}$; время срабатывания при $I = 6 I_{\text{ном}}$ составляет 4—16 с; время срабатывания при коротком замыкании 0,1—0,4 с.

На рис. 4-31 даны защитные характеристики автоматов А-3700 при двух уставках $t_{\text{уст}}$ времени срабатывания. Автоматы на большие токи (серий Э, АВ) имеют параллельно включаемые главные и дугогасительные контакты. Принцип построения контактно-дугогасительной системы таких автоматов показан на рис. 4-32. Контакты главной цепи выполнены в виде медных роликов 1 с серебряными накладками или гальваническим покрытием серебром (30 мкм). Дугогасительные контакты 3 и 6 совмещены с компенсатором электродинамических усилий (детали 4—5). При отключении цепи первыми размыкаются контакты главной цепи. Дуга на них не возникает, так как ток переходит в параллельные им дугогасительные контакты, которые размыкаются позднее главных. Отключение аппарата осуществляется поворотом главного вала 7. Тогда ролик 1 отходит вправо и затем ролик 2 оказывает нажатие на подвижный дугогасительный контакт 6, поворачивая его по часовой стрелке вокруг оси. При включении аппарата вал 7 вращается против часовой стрелки.

Автоматы серии Э («Электрон») работают на распределительных подстанциях 380 и 660 В переменного и 220 и 440 В постоянного тока. Они снабжаются ручным и электродвигательным приводом; защита обеспечивается полупроводниковым расцепителем. Технические параметры этих автоматов даны в табл. 4-4.

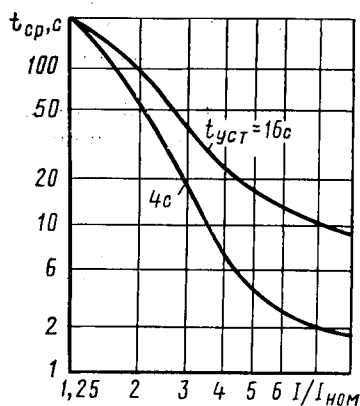


Рис. 4-31. Защитные характеристики автоматов А-3700

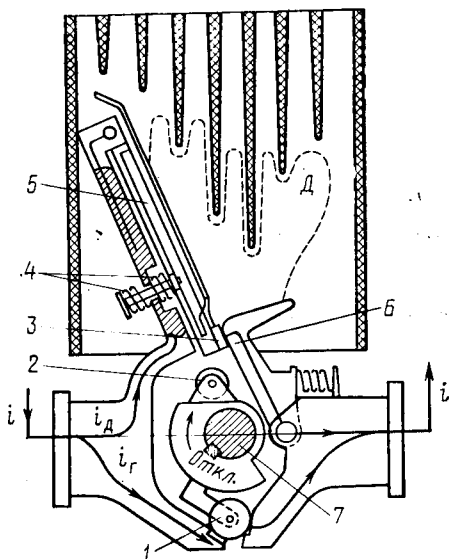


Рис. 4-32. Контактно-дугогасительное устройство автомата на большие токи

Таблица 4-4

Исполнение	Тип	Номинальный ток, А	Переменный ток				Постоянный ток		
			ток включения, кА	действующее значение тока отключения, кА		коэффициент мощности	ток отключения		постоянная времени, мс
				380 В	660 В		440 В	220 В	
Стационарной установки	Э06С	1000	85	40	30	0,25	35	25	10
	Э25С	4000	140	65	55	0,2	60	50	15
	Э40С	6300	255	115	85	0,2	65	55	15
Выдвижные	Э06В	1000	85	40	30	0,25	35	25	10
	Э25В	2500	100	45	35	0,2	55	45	15
	Э40В	5000	160	65	50	0,2	65	55	15

§ 4-9. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

В истории развития электрических аппаратов *плавкие предохранители* явились первыми и наиболее дешевыми устройствами для защиты от токов короткого замыкания. Основным элементом предохранителя — *металлическая плавкая вставка*, сгорающая при повышенном токе. Процесс срабатывания предохранителя делится на несколько стадий: нагревание вставки до температуры плавления

ния, плавление и испарение вставки, возникновение и гашение электрической дуги с восстановлением изоляционных свойств образующего изоляционного промежутка.

Наиболее распространенные материалы плавких вставок — медь, цинк, алюминий, свинец и серебро. Вставки из цинка и свинца имеют низкую температуру плавления (419 и 327°C), поэтому температура нагрева всего предохранителя при длительном прохождении номинального тока также не может быть большой. При плавлении на внешней поверхности цинк образует прочные пленки окисла, внутри которых может находиться жидкий металл. В этих условиях после плавления вставки цепь тока не прерывается и значение пограничного тока может оказаться неопределенным. Цинк имеет относительно высокий потенциал ионизации ($9,4$ электрон-вольт), что способствует гашению дуги. Известно, что цинк устойчив против коррозии, поэтому сечение плавких вставок из цинка в эксплуатации не изменяется и их защитные характеристики остаются стабильными. Так как цинк и свинец имеют сравнительное высокое удельное электрическое сопротивление, поперечное сечение вставок из этих металлов оказывается значительным.

Медные вставки подвержены окислению; их сечение со временем уменьшается, токи и времена срабатывания изменяются и перестают соответствовать заданным значениям. Покрытие медных вставок слоем олова (лужение) позволяет сохранять стабильность их сечения и характеристик. Серебряные вставки не окисляются и их характеристики наиболее стабильны. Но серебро дорого, поэтому его применяют лишь в особо ответственных случаях. Если необходимо получить большую выдержку времени предохранителя при перегрузках, следует применять плавкие вставки из цинка и свинца. Вставки из серебра и меди дают меньшие выдержки времени.

Алюминиевые вставки применяются в предохранителях в связи с острым дефицитом традиционных цветных металлов. Высокое сопротивление окисных пленок на алюминии затрудняет осуществление надежного разъемного контакта. Толстая окисная пленка образует тугоплавкую оболочку на поверхности вставки и затрудняет ее разрушение при плавлении токами короткого замыкания (жидкий металл удерживается в «трубке» из пленки). Но эти недостатки устранены и алюминиевые вставки нашли применение в предохранителях разработки последних лет.

По принципу устройства предохранители можно разделить на следующие виды: с открытой плавкой вставкой в воздухе; закрытые предохранители; предохранители с наполнителем (засыпные); жидкометаллические и инерционные.

Закрытые предохранители обычно выполняются в виде фибровой трубки, закрытой с концов латунными колпаками. Внутри трубки размещаются фигурные плавкие вставки (обычно из цинка). Образующаяся при сгорании вставки электрическая дуга горит в закрытом объеме и не выходит за пределы трубки. При

горении дуги часть материала (фибры) стенок переходит в газообразное состояние (примерно 50% CO_2 , 40% H_2 и 10% H_2O). Условия гашения дуги улучшаются, так как при этом повышается давление в трубке и улучшаются условия теплопередачи от дуги (водород имеет высокую теплопроводность).

Когда повышается давление газа и уменьшаются расстояния взаимодействия между частицами, энергия от более нагретых частиц, характеризующая их температурой или скоростями движения, легче переходит к менее нагретым частицам. Условия охлаждения столба дуги улучшаются, а это ведет к росту электрического сопротивления (и напряжения) дуги.

Сокращение расстояний взаимодействия между частицами с повышением давления приводит к уменьшению длины свободного пробега электронов в газе. При прочих равных условиях это снижает интенсивность процессов ионизации, так как электрон на меньшей длине свободного пробега способен приобрести меньшую энергию, двигаясь в электрическом поле. Это также приводит к росту сопротивления и напряжения дуги.

Определим давление в условиях непродолжительного горения дуги в замкнутом объеме, когда энергию дуги при отключении цепи постоянного тока с индуктивностью L и током I_0 можно считать равной электромагнитной энергии цепи: $W_d = LI_0^2/2$.

Как известно из теории электрической дуги отключения, эта энергия переходит в тепловую энергию дуги и рассеивается затем в окружающую среду. В условиях закрытого объема энергия дуги расходуется на повышение внутренней энергии W_r данного объема газа V .

Из кинетической теории газов известно соотношение, связывающее произведение давления p на объем газа V с энергией W_r :

$$pV = (2/3) W_r = 2 W_d/3 = LI_0^2/3.$$

Отсюда $p = LI_0^2/3V$, где p — давление, Па (Н/м^2); L — индуктивность, Гн; I_0 — ток; V — объем, м^3 .

В общем случае давление внутри предохранителя

$$p = \frac{2}{3V} W_d = \frac{2}{3V} \int_0^{t_r} U_d i_d dt,$$

где U_d — напряжение, i_d — ток дуги.

В предохранителях закрытого типа обычно применяются плавкие фигурные вставки (рис. 4-33, б, в) и реже — вставки постоянного сечения (рис. 4-33, а).

При отключении больших токов давление внутри трубки может достигать 10^7 Па, что недопустимо в отношении механической прочности трубки. Плавкая фигурная вставка дает возможность снизить давление до допустимых значений, так как она ограничивает ток короткого замыкания и уменьшает выделение

энергии в дуге. При коротком замыкании узкий перешеек вставки начинает плавиться прежде, чем ток короткого замыкания достигнет установившегося значения. Сопротивление расплавленного перешейка и возникшей вслед за этим дуги ограничивают ток короткого замыкания.

Когда узкие перешейки вставки перегорают, ее широкие металлические части падают вниз. Увеличение содержания паров металла, имеющих низкий в сравнении с газом потенциал ионизации, ведет к росту электропроводности дугового промежутка и ухудшению условий гашения электрической дуги. Наличие узких перешейков вставки снижает также перенапряжение при гашении дуги, так как полная длина дугового промежутка и соответствующее ей сопротивление вводится

в цепь не сразу, а ступенями. Узкие перешейки вставки позволяют уменьшить температуру нагрева предохранителя в режиме протекания номинального тока вследствие того, что сопротивление плавкой фигурной вставки меньше сопротивления вставки, узкой по всей длине.

При коротком замыкании плавкая фигурная вставка перегорает в наиболее узком месте. При токах перегрузки в установившемся режиме теплота от узких перешейков вставки отводится в участки с большими сечениями. Поэтому максимальная температура и перегорание вставки наблюдаются не в узком перешейке,

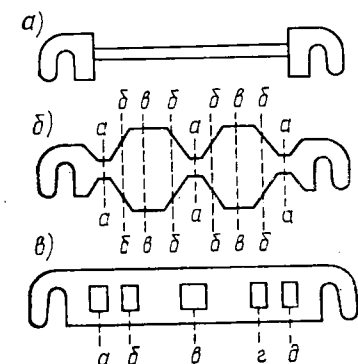


Рис. 4-33. Формы плавких вставок

а на некотором расстоянии от него, например, на участках a — b рис. 4-33, b и на участках a — d рис. 4-33, $в$. Температура в широких участках фигурной вставки ниже, чем на узких участках, так как широкая часть вставки имеет большую боковую поверхность и улучшенные условия охлаждения. Закрытые предохранители разборного типа способны отключать токи до 10—30 кА при напряжении источника 220—500 В.

Закрытые предохранители отечественного производства серии ПР-2 (разборные) имеют номинальные токи от 100 до 1000 А, предельные отключаемые токи при напряжении 380 В и $\cos \varphi \geq 0,4$ составляют от 6 до 20 кА, отношение пограничного тока (минимальный ток срабатывания) к номинальному составляет $I_{\text{погр.}}/I_{\text{ном}} = 1,3 \div 1,6$.

В засыпных предохранителях плавкие вставки размещаются в среде мелкозернистого твердого наполнителя, помещающегося в фарфоровом или пластмассовом корпусе. Возникающая при плавлении вставок электрическая дуга тесно соприкасается с мелкими зернами наполнителя, интенсивно охлаждается, деионизиру-

ется и поэтому быстро гасится. Вольтамперная характеристика дуги в засыпном предохранителе при токах до 60—100 А имеет падающий характер. Но начиная с токов 60—100 А, она становится возрастающей, подобно характеристике дуги в щелевых камерах.

В качестве наполнителя засыпных предохранителей обычно используется сухой кварцевый песок с содержанием оксида кремния SiO_2 не менее 99%. Речной песок содержит 98% SiO_2 . Остальные 2% примесей могут приводить к образованию токопроводящих мостиков и затруднять гашение дуги. Поэтому неочищенный речной песок широко не применяется. Зерна кварца должны иметь размер 0,1—0,5 мм. Один грамм его может аккумулировать энергию 2 кВт·с. Вместо кварца можно применять мел (CaCO_3). Иногда для придания рыхлости наполнителю его смешивают с асбестовыми волокнами. Мел более предпочтителен, так как он не образует токопроводящих путей. Он разлагается с выделением углекислого газа CO_2 и оксида кальция CaO — тугоплавкого материала с высоким электрическим сопротивлением. Реакция разложения мела проходит с поглощением энергии дуги и способствует ее гашению. Широкое применение мела ограничивает его высокая стоимость по сравнению с песком.

Засыпные отечественные предохранители серии ПН2 имеют номинальные токи от 100 до 600 А, предельный отключающий ток при напряжении 500 В и $\cos \varphi = 0,1 \div 0,3$ находится в пределах от 25 до 50 кА. Взамен ПН2 сейчас разработаны новые предохранители серии ПП31 с алюминиевыми плавкими вставками на номинальные токи от 63 до 1000 А (предельный ток отключения до 100 кА при напряжении 660 В). В любых предохранителях имеются возможности устанавливать разные плавкие вставки на соответствующий им номинальный ток. Поэтому каждому предохранителю свойственна серия защитных характеристик, относящихся к разным номинальным токам плавких вставок. Такие характеристики, т. е. зависимости времени срабатывания от значения тока, при разных номинальных токах плавкой вставки для предохранителя типа ПП31 даны на рис. 4-34.

На основе засыпных построены быстродействующие предохранители для защиты полупроводниковых установок от токов короткого замыкания. Область допустимых времен нагрузки отечественных вентилях током относительно номинального дана на рис. 4-35. Эти кривые показывают, что от токов короткого замыкания, которые в десятки раз и более могут превышать номинальные, полупроводники надо защищать за время, равное сотым и тысячным долям секунды. Такие малые времена срабатывания засыпных предохранителей достигаются в основном выбором геометрических размеров фигурных плавких вставок. Для этого уменьшают сечение плавкого перешейка ($a-a$ на рис. 4-33), его длину, улучшают условия теплоотвода от него путем увеличения сечения вставки в широкой части ($b-b$ на рис. 4-33) и расположения этого перешейка на изоляционных элементах с высокими теплоотводящими

свойствами. Все это обеспечивает усиленное охлаждение узкого перешейка при номинальных токах; температура его нагрева не превышает допустимую. При токе короткого замыкания возникает адиабатный режим, теплота не успевает отводиться от узкого перешейка, он мгновенно взрывается и ток отключается.

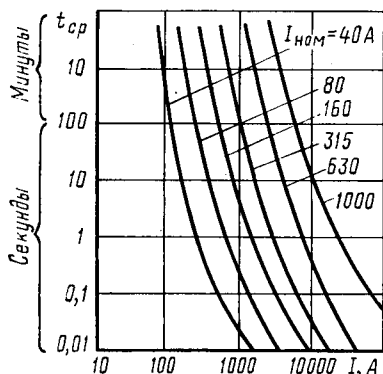


Рис. 4-34. Защитные характеристики предохранителя ПП-31 при разных номинальных токах плавкой вставки

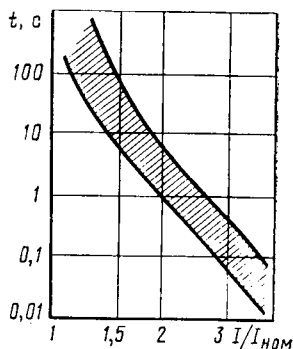


Рис. 4-35. Допустимое время нагрузки током отечественных полупроводниковых вентилялей ($I_{ном}$ — номинальный ток)

Серии отечественных быстродействующих предохранителей для защиты полупроводниковых приборов ПП-41, ПП-57, ПП-71 и других выполняются с плавкими вставками из серебра. Защитные характеристики одной из этих серий даны на рис. 4-36, а. Они отно-

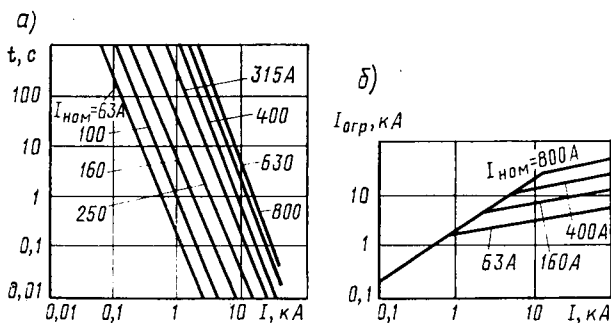


Рис. 4-36. Характеристики быстродействующего предохранителя ПП-57

сятся к разным номинальным токам плавкой вставки $I_{ном}$. С ростом $I_{ном}$ увеличивается поперечное сечение плавкой вставки и вследствие этого вырастает время срабатывания. Сопротивлением возникающей электрической дуги быстродействующие предохранители ограничивают отключаемый ток. Степень этого огра-

нижения предохранителем ПП-57 показана на рис. 4-36, б, где дана зависимость ограниченного тока $I_{огр}$ в сети напряжения 660 В от расчетного тока короткого замыкания при разных номинальных токах плавкой вставки $I_{ном}$. Чем меньше этот ток и сечение вставки, тем больше сопротивление дуги и степень ограничения тока вследствие уменьшения количества паров металла в дуге.

Основные технические параметры отечественных быстродействующих предохранителей трех серий даны ниже:

Серия	ПП-41	ПП-52	ПП-71
Напряжение, В:			
переменный ток	~760	~330	~1300
постоянный ток	440		
Диапазон номинального тока, А . .	100—630	100—400	550 и 750
Предельный ток отключения, кА .	100	100	—
Ограниченный ток, кА	25	15	—

Резкое возрастание сопротивления электрической дуги при работе мощных предохранителей, особенно быстродействующих, может вызвать перенапряжение $U_{\max} = L di/dt$. Согласно нормам, допустимые $U_{\max}$ зависят от номинального напряжения $U_{ном}$:

$U_{ном}, В$	$U_{\max}, В$
60	1000
300	2000
301—660	2500
661—800	3000
801—1000	3500

Обычно защита асинхронных двигателей от перегрузки осуществляется тепловыми реле, а от токов короткого замыкания — предохранителями. Защитить двигатели от токов перегрузки и короткого замыкания с помощью одних предохранителей нельзя, так как защитные характеристики существующих предохранителей имеют резко спадающий вид (рис. 4-37). Если, например, предохранитель имеет характеристику 1, пограничный ток которой близок к номинальному $I_{ном}$ защищаемого двигателя, то она обеспечивает защиту от небольших токов перегрузки. Но такой предохранитель срабатывает при пусковых токах двигателя, равных $i = 5 \div 8$ от $I_{ном}$ и протекающих в течение 0,5 с. Если предохранитель имеет характеристику 3, то он не срабатывает при пуске двигателя и дает возможность нормально осуществлять этот пуск. Но характеристика 3 имеет пограничный ток $I_{погр}$, недопустимо превышающий номинальный $I_{ном}$. Поэтому предохранитель с такой характеристикой не защищает двигатель от небольших токов перегрузки.

Для обеспечения защиты двигателя от токов перегрузки и короткого замыкания, а также для осуществления его пуска надо, чтобы защитный аппарат имел характеристику типа 2. Эта характеристика на участке б—в обеспечивается нормальной плавкой вставкой предохранителя увеличенного сечения (с током $I_{\text{погр}}$), а на участке а—б — другим элементом, например, легкоплавким сплавом. В инерционных предохранителях (рис. 4-38) имеются два таких элемента.

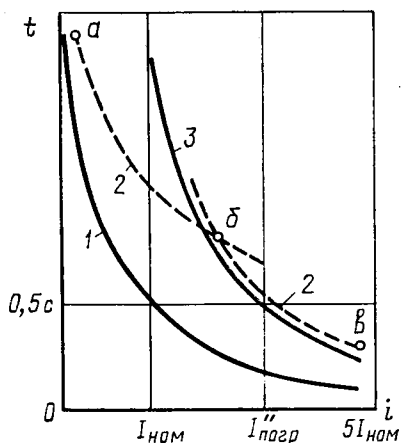


Рис. 4-37. Защитная характеристика инерционного предохранителя

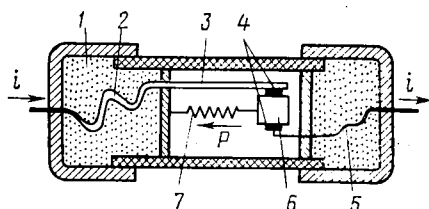


Рис. 4-38. Схема инерционного предохранителя

При токах перегрузки повышается температура нагревательного элемента 2 и теплота от него через пластину 3 передается к легкоплавкому спаю 4. Расплавляясь, он освобождает деталь 6, которая пружиной 7 перемещается влево. В результате возникает

и гасится электрическая дуга, а цепь тока разрывается. При токах короткого замыкания спай 4 не успевает расплавиться, так как сначала перегорает плавкая вставка 5, расположенная в зернистом наполнителе 1. Нагреваемый элемент 2 вместе со спаем 4 определяет участок а—б, а плавкая вставка 5 — участок б—в защитной характеристики предохранителя, изображенной на рис. 4-37.

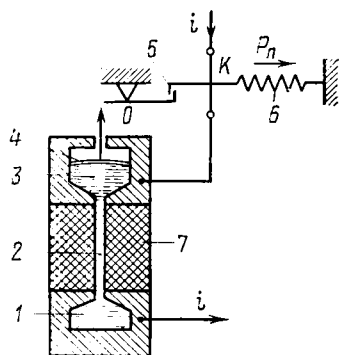


Рис. 4-39. Принцип действия жидкометаллического предохранителя

Отечественная промышленность выпускает инерционные предохранители серии ИП на напряжение 30 В и токи от 5 до 250 А. В последние годы разрабатываются жидкометаллические предохранители, которые не требуют смены плавкой вставки. Этот элемент

в них восстанавливается автоматически. Принцип устройства такого предохранителя показан на рис. 4-39. В изоляционной трубке 7 имеется канал 2 малого диаметра, заполненный жидким металлом (галлий, сплав Ga—In—Sn и др.) из резервуаров 1 и 3.

При токе короткого замыкания узкий жидкометаллический столбик в канале 2 взрывается и дуга в нем гаснет. Возникающее давление воздействует на мембрану 4, в результате чего расцепляется защелка 5. Пружиной 6 размыкаются контакты К, обеспечивая разрыв цепи тока i после восстановления проводимости канала 2 (заполнение его жидким металлом). В других вариантах предохранителей контакты 7 размыкаются электромагнитным приводом, срабатывающим от напряжения, повышающегося при гашении дуги.

§ 4-10. РАСЧЕТ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Процесс срабатывания предохранителя делится на несколько стадий: *нагревание вставки до температуры плавления, плавление и испарение вставки, возникновение и гашение электрической дуги с восстановлением изоляционных свойств промежутка*. Обычно рассчитывают лишь процессы в первых двух стадиях. Время протекания третьей стадии определяется на основе опытных данных. При определении защитных (амперсекундных) характеристик предохранителей широко используют понятие о «джоулевом интеграле» $\int i^2 dt$, который следует из закона Джоуля—Ленца о выделяемой током тепловой мощности $i^2 R$ и энергии $\int i^2 R dt$.

Пограничный ток (минимальный ток срабатывания). Расчетный пограничный ток $I_{\text{погр}}$ берется больше номинального тока. Отношение $K_3 = I_{\text{погр}} / I_{\text{ном}}$ для различных вставок равно:

Вставки:

медные	1,6—2,0
серебряные	1,1—1,6
цинковые и свинцовые	1,25—1,45

Этот запас расчетного пограничного тока предохранителя относительно номинального тока определяется возможностью снижения фактического пограничного тока из-за уменьшения сечения плавкой вставки в эксплуатации вследствие ее коррозии и технологических отклонений при изготовлении. Плавкая вставка не должна иметь заниженное сечение также и потому, что в длительном режиме протекания номинального тока изоляционные и контактные детали предохранителя могут нагреться до недопустимо высокой температуры.

Пограничный ток открытой бесконечно длинной плавкой вставки в воздухе можно рассчитать на основе уравнения баланса мощностей из условия достижения температуры плавления $T_{\text{пл}}$:

$$RI_{\text{погр}}^2 = K_T S_6 (T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}). \quad (4-36)$$

Здесь K_T — коэффициент теплопередачи с наружной поверхности вставки; $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, °С.

Зависимость сопротивления R плавкой вставки от удельного электрического сопротивления ρ_0 ее материала, его температурного коэффициента α , длины l и сечения вставки S определяется соотношением $R = \rho_0(1 + \alpha T_{пл})l/S$.

Боковая поверхность охлаждения выражается через периметр поперечного сечения p и длину вставки l , т. е. $S_6 = pl$.

С учетом этих зависимостей из (4-36) получаем окончательное выражение для пограничного тока $I_{погр}$ (А):

$$I_{погр} = \sqrt{K_T p S (T_{пл} - T_{окр}) [\rho_0 (1 + \alpha T_{пл})]}. \quad (4-37)$$

Здесь K_T — коэффициент теплопередачи, Вт/(см²·град); p — периметр поперечного сечения, см²; S — сечение, см²; $T_{окр}$ — температура плавления материала и окружающей среды, °C; ρ_0 — удельные электрические сопротивления материала, Ом·см; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/°C.

Если плавкая вставка короткая, то часть тепловой мощности отводится по ней в контакт-детали, на которых крепятся ее концы. Пограничный ток увеличивается в сравнении с рассчитанным по (4-37). Для вычисления фактического пограничного тока по сравнению с рассчитанным по (4-37) вводится поправочный коэффициент K_l :

$$I_{погр.ф} = K_l I_{погр},$$

где $K_l = 1 + [\pi/(4l)] \sqrt{2\lambda S/(K_T p)}$. Здесь l — длина вставки, см; λ — теплопроводность материала вставки, Вт/(см·град).

Пограничный ток бесконечно длинной плавкой вставки засыпного предохранителя (рис. 4-40, а, б) можно рассчитать, используя стационарное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат:

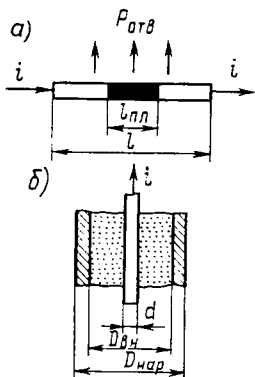
$$I^2 R_0 = (1/r)(d/dr)(\lambda r dT/dr).$$

Если теплопроводность λ принять не зависящей от температуры T , то уравнение преобразуется:

$$\lambda d^2 T/dr^2 + (\lambda/r) dT/dr = I^2 R_0, \quad (4-38)$$

где R_0 — электрическое сопротивление вставки на единицу длины; r — расстояние в радиальном направлении.

Рис. 4-40. Участки плавкой вставки в воздухе (а) и в наполнителе (б)



В теории теплопроводности найдено решение этого уравнения при соответствующих граничных условиях на поверхностях перехода из одной среды в другую (равенство температур и тепловых потоков) и теплообмене на наружной поверхности по закону Ньютона.

Для двухслойной концентрической системы (рис. 4-40, б)

$$T = T_{\text{окр}} + \frac{I^2 R_0}{2\pi} \left(\frac{8}{K_T D_{\text{н}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{нар}}} \ln \frac{D_{\text{вт}}}{d} + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{D_{\text{нар}}}{D_{\text{вт}}} \right). \quad (4-39)$$

Это уравнение не учитывает изменение сопротивления вставки в зависимости от температуры. Для определения пограничного тока примем $R_0 = 4\rho_0 (1 + \alpha T_{\text{пл}}) (\pi d^2)$.

При пограничном токе $I_{\text{погр}}$ вставка нагревается до температуры плавления $T_{\text{пл}}$. Из (4-39) находим окончательное выражение для пограничного тока засыпного предохранителя (обозначения см. на рис. 4-40, б):

$$I_{\text{погр}} = \pi d \sqrt{\frac{T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}}{2\rho_0 (1 + \alpha T_{\text{пл}}) \left(\frac{8}{K_T D_{\text{нар}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{н}}} \ln \frac{D_{\text{вт}}}{d} + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{D_{\text{нар}}}{D_{\text{вт}}} \right)}}. \quad (4-40)$$

Здесь $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{окр}}$ — температуры плавления материала и окружающей среды, °С; ρ_0 — удельное электрическое сопротивление материала вставки, Ом · см; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/град; K_T — коэффициент теплопередачи, Вт/(см² · град); $\lambda_{\text{н}}$ и λ_T — теплопроводность материала наполнителя и трубки, Вт/(см · град); $D_{\text{вт}}$, $D_{\text{нар}}$ и d — диаметры внутренний и наружный (трубки) и плавкой вставки, см.

Теплопроводность λ некоторых изоляционных материалов приведена ниже:

Материалы	λ , Вт/(см · град)
Асбест	0,00157
Кварц	0,10
Ф. ффор	0,01
Оргстекло	0,0015
Речной песок	0,0035
Фибрл	0,012

Защитная характеристика (время срабатывания предохранителя от тока). Время срабатывания предохранителя состоит из трех составляющих: t' — времени нагрева вставки от начальной температуры до температуры плавления $T_{\text{пл}}$; t'' — времени перехода материала вставки из твердого состояния в жидкое (после достижения температуры $T_{\text{пл}}$); t''' — времени гашения дуги.

Суммарное время

$$t = t' + t'' + t'''. \quad (4-41)$$

Первая слагающая рассчитывается на основе уравнения баланса мощности:

$$\gamma c V d T \frac{dt}{dt} + K_T S_0 (T - T_{\text{окр}}) = I^2 R. \quad (4-42)$$

Первый член в (4-42) определяет мощность на нагрев участка плавкой вставки, второй — отвод теплоты в окружающую среду, правая часть — мощность джоулевых потерь; γ — плотность; c — удельная теплоемкость материала вставки; V — ее объем. В (4-42) следует учесть влияние температурного коэффициента сопротивления, так как температура плавления вставок высокая: $R = \rho(1 + \alpha T) l / S$; $S_0 = pl$, где S — поперечное сечение, ρ — периметр; l — длина плавкой вставки.

В результате преобразования (4-42) получается дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами вида $dy/dx + Py = 0$, решение которого известно:

$$y = \exp\left(-\int P dx\right) \left[\theta \exp\left(\int P dx\right) + C_{\text{ин}}\right],$$

где $C_{\text{ин}}$ — постоянная интегрирования.

При начальном условии $t=0$, $T=T_{\text{н}}$ решение этого уравнения относительно температуры перегрева θ (разности между температурой нагрева проводника и температурой окружающей среды) имеет вид

$$\theta = \theta_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right)\right] + \theta_{\text{н}} \exp\left[-\frac{t}{\tau_T}\right]. \quad (4-43)$$

Здесь $\theta = T - T_{\text{окр}}$; $\theta_y = T_y - T_{\text{окр}}$; $\theta_{\text{н}} = T_{\text{н}} - T_{\text{окр}}$, где T_y — установившаяся температура нагрева проводника; $T_{\text{н}}$ — начальная температура нагрева вставки в номинальном режиме:

$$\theta_y = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha T)}{K_T p S - I^2 \alpha \rho_0}; \quad \tau_T = \frac{S^2 \gamma c}{K_T p S - I^2 \alpha \rho_0},$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·см; α — температурный коэффициент сопротивления.

Так как в предохранителях температура плавления вставки $T_{\text{пл}} \gg T_{\text{н}}$ и $T_{\text{н}} \approx T_{\text{окр}}$, то из (4-43) находим время t' достижения вставкой температуры плавления:

$$t' = \tau_T \ln \theta_y / (\theta_y - \theta_{\text{пл}}), \quad (4-44)$$

где $\theta_{\text{пл}} = T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}$.

Формула (4-44) используется для расчета защитной характеристики в зоне токов перегрузки $I \leq 5 I_{\text{ном}}$. Анализ показывает, что при $I > 5 I_{\text{ном}}$ возникает адиабатный процесс нагрева вставки, когда исходное уравнение (4-42) принимает вид $R I^2 dt = V \gamma c dT$.

С учетом зависимостей $R = \rho_0(1 + \alpha T) l / S$ и $V = Sl$ получаем

$$\rho_0 (I^2 / S^2) dt = \gamma c dT (1 + \alpha T_{\text{н}}).$$

Интегрируя в пределах времени от 0 до t' , когда температура вставки изменяется от $T_{\text{н}}$ до $T_{\text{пл}}$, получаем окончательное выражение для составляющей времени t' :

$$t' = A' (S^2 / I^2), \quad (4-45)$$

где $A' = [\gamma c / (\alpha \rho_0)] \ln [(1 + \alpha T_{\text{пл}}) / (1 + \alpha T_{\text{н}})]$.

Здесь S — сечение вставки, см²; I — ток, А; γ — плотность материала вставки, г/см³; c — теплоемкость материала вставки, Дж/(г·град); ρ_0 — удельное электрическое сопротивление, Ом·см; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/град; $T_{пл}$ и T_n — температура плавления и начальная температура вставки, °С.

Из выражения (4-45) следует, что джоулев интеграл $\int i^2 dt = I^2 t' = A'S^2$.

Джоулев интеграл по плотности тока j :

$$\int \frac{j^2}{S^2} dt = \int j^2 dt = A' = \frac{\gamma c}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha T_{пл}}{1 + \alpha T_n}. \quad (4-46)$$

Джоулев интеграл по плотности тока зависит только от физических параметров материала вставки и остается для него постоянным (см. ниже).

Для расчета второй составляющей t'' времени срабатывания предохранителя представим, что процесс плавления вставки начинается с какого-то небольшого ее участка. Пусть в некоторый момент времени длина расплавленного участка вставки $l_{пл}$. Тогда результирующее сопротивление вставки (рис. 4-40, а)

$$R = \rho_1 (l - l_{пл})/S + \rho_{пл} l_{пл}/S.$$

Здесь ρ_1 — удельное электрическое сопротивление твердой вставки, достигшей температуры плавления; $\rho_{пл}$ — удельное электрическое сопротивление расплавленного материала вставки.

Эта формула преобразуется к виду

$$R = (l/S)[\rho_1 + (\rho_{пл} - \rho_1) l_{пл}/l].$$

Тепловая энергия, выделяющаяся во вставке за время dt ,

$$dW_1 = I^2 (l/S)[\rho_1 + (\rho_{пл} - \rho_1) l_{пл}/l] dt.$$

За это же время длина расплавленной части вставки увеличивается на $dl_{пл}$, а тепловая энергия, затраченная на плавление, $dW_2 = S\gamma L_c dl_{пл}$, где γ — плотность материала вставки; L_c — скрытая теплота плавления.

Приравняв dW_1 и dW_2 и разделив переменные t и $l_{пл}$, получим

$$dt = [S^2 \gamma L_c / (I^2 l)] dl_{пл} / [\rho_1 + (\rho_{пл} - \rho_1) l_{пл}/l].$$

Интегрируя в пределах времени от 0 до t'' , когда длина расплавленной части $l_{пл}$ вставки изменяется от 0 до l , найдем окончательное выражение для составляющей времени t'' :

$$t'' = A'' (S^2/I^2), \quad (4-47)$$

где $A'' = [\gamma L_c / (\rho_{пл} - \rho_1)] \ln (\rho_{пл}/\rho_1)$.

Здесь $\rho_{пл}$ и ρ_1 — удельные электрические сопротивления вставки в расплавленном и нагретом до температуры плавления (но еще не расплавленном) состояниях, Ом·см; L_c — скрытая теплота плавления материала вставки, Дж/с.

Параметр A'' также представляет собой джоулев интеграл по плотности тока для периода плавления вставки:

$$\int j^2 dt = A'' = [\gamma L_c / (\rho_{пл} - \rho_1)] \ln (\rho_{пл} / \rho_1). \quad (4-48)$$

Физические параметры металлов, используемых для плавких вставок, приведены в табл. 4-5.

Т а б л и ц а 4-5

Параметры	Металлы					
	Ag	Cu	Al	Zn	Pb	Sn
$\rho_{пл}$, Ом·см	18×10^{-6}	20×10^{-6}	$\rho_{пл}/\rho_1 = 1,6$	36×10^{-6}	94×10^{-6}	$\rho_{пл}/\rho_1 = 2,1$
ρ_1 , Ом·см	$7,1 \times 10^{-6}$	8×10^{-6}	—	16×10^{-6}	49×10^{-6}	—
A' , А ² с/см ⁴	62×10^3	80×10^3	28×10^3	9×10^3	$1,2 \times 10^3$	2×10^3
A'' , А ² с/см ⁴	8×10^3	11×10^3	—	3×10^3	400	—

Составляющая t''' , определяемая временем гашения дуги в предохранителе, не поддается расчету. Она учитывается путем введения эмпирических коэффициентов в формулы для результирующего времени срабатывания предохранителя. В эмпирическом выражении эта формула для открытой плавкой вставки в воздухе имеет вид

$$t = t' + t'' + t''' = (1,2 - 1,3)(A' + A''/3) S^2/I^2. \quad (4-49)$$

Рассмотренные соотношения для расчета характеристик предохранителей не учитывают влияния ряда факторов. Более точный расчет этих характеристик приведен в [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таев И. С. Электрические аппараты управления.— М.: Высшая школа, 1969.
2. Основы теории электрических аппаратов/Буль Б. К., Буткевич Г. В., Кураев В. Г. и др.— М.: Высшая школа, 1970.
3. Таев И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения.— М.: Энергия, 1973.
4. Таев И. С. Электрические аппараты автоматики и управления.— М.: Высшая школа, 1975.
5. Брон О. Б., Сушков Я. К. Потоки плазмы в электрической дуге включающих аппаратов.— Л.: Энергия, 1975.
6. Ким Е. И., Омельченко В. Т., Харин С. Н. Математические модели тепловых процессов в контактах.— Алма-Ата: Наука, 1977.
7. Белкин Г. С., Буткевич Г. В., Жаворонков М. А. Электрическая эрозия силовых контактов и электродов.— М.: Энергия, 1978.
8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел/Пер. с англ. В. П. Исаченко.— М.: Наука, 1965.
9. Памитонов К. К. Электроэрозионные явления.— М.: Энергия, 1978.
10. Баринберг А. Д. Магнитогидродинамические аппараты.— М.: Энергия, 1978.
11. Кобленц М. Г. Силовые герконы.— М.: Энергия, 1979.
12. Брон О. Б. Электрическая дуга в аппаратах управления.— Л.: Госэнергоиздат, 1954.
13. Никифоровский Н. Н. О коммутации тока при размыкании одной из двух параллельных цепей.— Электричество, 1959, № 12.
14. Лядова Л. Я., Сивков А. П. Расчет быстродействующего автомата. Механические взаимодействия в сильных магнитных полях.— Межвузовский сборник.— Л.: Энергия, 1974.
15. Кузнецов Р. С. Аппараты распределительных устройств напряжением до 1000 В.— М.: Энергия, 1970.
16. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики.— М.: Энергия, 1970.
17. Чунихин А. А. Электрические аппараты.— М.: Энергия, 1975.
18. Таев И. С. Электрические аппараты. Общая теория.— М.: Энергия, 1977.
19. Залесский А. М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов.— Л.: Энергия, 1957.
20. Буль Б. К., Шоффа В. Н. Реле на герметизированных магнитоуправляемых контактах.— М.: МЭИ, 1977.
21. Сливинская А. Г., Гордон А. В. Электромагниты постоянного тока.— М.: Госэнергоиздат, 1960.
22. Бела-Белов А. М. Низковольтные аппараты повышенной частоты.— М.: Энергия, 1978.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аппараты высокочастотные 139
— условия работы 140
— управления, схемы включения 11
- Вибрации якоря, электромагнита 135
Виток короткозамкнутый (на полюсе электромагнита) 136
Вставки плавкие 229
Выключатели автоматические 168
— гашения магнитного поля 222
— защиты от поражения током 96
— индукционно-динамические 218
— универсальные 198
— электродинамические 211
- Герконы 63
— силовые 154
- Дутье магнитное 83
— при переменном токе 86
- Защита максимальная, токовая 58
— от поражения током 195
— позисторная от перегрузки 73
— селективная 182
— тепловая на биметаллических элементах 68
— тепловая позисторная 74
- Измерение собственной частоты 45
Износ контактов дуговой 129
- Камеры дугогасительные 87
— щелевые 90
- Категории применения контакторов 94
- Классы нагревостойкости изоляции 25
- Коммутаторы тиристорные 162
- Компенсаторы электродинамических усилий 200
- Контакты вакуумные 152
— герметизированные 146
— гибридные 161
— жидкометаллические 147
— категории применения 77
— разных серий 173
— синхронные 155
— тиристорные 164
— устройство 80
- Контакты износ 126
— материалы 37
— сваривание 42
- Коэффициент возврата 59, 207
— ударный 15
- Материалы контактов 37
— сверхпроводниковые 14
- МГД-аппарат 147
- Методы измерения восстанавливающейся прочности 97
- Муфты гистерезисные 56
— ферропорошковые 54
— фрикционные 50
- Отсечка токовой защиты 193
- Перенапряжения при отключении 23, 110
- Потоки плазмы 131
- Предохранители засыпные 232
— инерционные 236
- Привод электромагнитный 133
- Прочность восстанавливающаяся электрическая 95
- Пускатели контактные 82
— тиристорные 167
- Расцепители биметаллические 68
— полупроводниковые 209
— терромагнитные 208
— электромагнитные 205
- Расчет герконов 64

— дугогасительных решеток 117
— дугогасительных щелевых камер 119
— контактов 36
— контакторов 181
— открытой дуги 116
— тепловых реле 70
— токоведущих частей 27
— характеристик предохранителей 237

Реле времени 58, 64

— тепловые 68

— тока 57

Режимы аварийные 189

— нагрузки током 32

Решетки дугогасительные 93

Силы в контактах 40

Сопротивление контактов электрическое 38

Стойкость аппаратов термическая 29

Схемы включения аппаратов 8, 11

Токи сваривания контактов 41

Уравнение электрической дуги динамическое 18

Условия отключения тока 17

Характеристики вольтамперные дуги 108

Хольма формула 39

Частота цепей собственная электрическая 20, 24

Эквивалентные длительные токи 32

Энергия дуги 111

Эрозия контактов 127

Эффект близости 26

— поверхностный 25

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Виды аппаратов управления, условия их работы и элементы расчета	8
§ 1-1. Виды аппаратов и их применение	8
§ 1-2. Особенности процессов коммутации тока при низком напряжении источника	14
§ 1-3. Расчет тепловых режимов токоведущих частей	23
§ 1-4. Эквивалентные длительные токи в различных режимах работы	32
§ 1-5. Расчет контактов	36
§ 1-6. Собственная частота и коэффициент амплитуды восстанавливающегося напряжения в низковольтных сетях	44
Глава 2. Электромагнитные муфты и реле управления	50
§ 2-1. Электромагнитные муфты	50
§ 2-2. Электромагнитные реле управления	57
§ 2-3. Магнитоуправляемые контакты (герконы)	63
§ 2-4. Тепловые реле	68
Глава 3. Контактторы и пускатели	75
§ 3-1. Устройство контакторов и пускателей	75
§ 3-2. Системы магнитного дутья	83
§ 3-3. Дугогасительные камеры	87
§ 3-4. Восстанавливающаяся прочность	95
§ 3-5. Расчет дугогасительных устройств постоянного тока	106
§ 3-6. Расчет дугогасительных устройств переменного тока	113
§ 3-7. Эрозия и дуговой износ контактов	126
§ 3-8. Электромагнитный привод	133
§ 3-9. Высокочастотные аппараты	139
§ 3-10. Жидкометаллические и герметизированные контакторы	146
§ 3-11. Синхронные контакторы	155
§ 3-12. Гибридные контакторы	160
§ 3-13. Тиристорные пускатели	164
§ 3-14. Конструктивные схемы и технические параметры общепромышленных серий отечественных контакторов и пускателей	173
§ 3-15. Последовательность расчета контактора	181

Глава 4. Автоматические выключатели и предохранители	188
§ 4-1. Защита от аварийных режимов	188
§ 4-2. Устройство автоматических выключателей (автоматов) . .	197
§ 4-3. Переход тока с главных контактов в параллельную цепь . .	201
§ 4-4. Расцепители автоматов	204
§ 4-5. Быстродействующие автоматические выключатели	211
§ 4-6. Электродинамические автоматические выключатели	217
§ 4-7. Автоматы гашения магнитного поля	222
§ 4-8. Автоматические выключатели общепромышленного применения	226
§ 4-9. Плавкие предохранители	229
§ 4-10. Расчет плавких предохранителей	237
Список литературы	243
Предметный указатель	244

Иван Сергеевич Таев

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Зав. редакцией *Н. И. Хрусталева*. Редактор *З. Г. Овсянникова*. Мл. редактор *Т. Ф. Артюхина*. Художественный редактор *В. И. Мешалкин*. Технический редактор *З. В. Нуждина*. Корректор *В. В. Кожуткина*. Переплет художника *А. А. Акимова*.

ИБ № 3990

Изд. № Стд-369. Сдано в набор 08.07.83. Подп. в печать 06.08.84. Т-05476. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 15,5 усл. печ. л. Усл. кр.-отт. 15,5. Уч.-изд. л. 16,30. Тираж 11000 экз. Заказ № 4137. Цена 1 руб.

Издательство „Высшая школа“, 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14

Республиканская ордена «Знак Почета» типография имени П. Ф. Анохина Государственного комитета Карельской АССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 185630. Петрозаводск, ул. «Правды», 4.